

Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer
manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Schreiber

aus Frankfurt am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Tag der Einreichung:	04.02.2011
Tag der mündlichen Prüfung:	10.05.2011

Darmstadt, 2012

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Mitarbeiter des Instituts für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder, dem Leiter des Institutes, der mich stets sehr in meiner Arbeit unterstützte und mir dennoch genug Freiraum gab, meine eigenen Ideen umzusetzen.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner bedanke ich mich herzlich sowohl für die Übernahme des Korreferates wie auch für die überaus gute Zusammenarbeit in dem von ihm initiierten DFG-Forschungsprojekt *Conduct-by-Wire*. Mein Dank gilt in diesem Zusammenhang auch den Kollegen des Fachgebietes Fahrzeugtechnik Stephan Hakuli und Sebastian Geyer, die als Partner in der Forschungs Kooperation zum Entstehen dieser Arbeit entscheidend beigetragen haben.

Die freundschaftliche Atmosphäre innerhalb des Instituts für Arbeitswissenschaft und des Forschungsschwerpunktes Fahrzeugergonomie mit der Gruppenleiterin Dr.-Ing. Bettina Abendroth haben wesentlich zum positiven Gelingen der Arbeit beigetragen. Darüber hinaus gilt mein expliziter Dank Frau Michaela Kauer, für die überaus gute und zielgerichtete Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten, Herrn Benjamin Franz für die umfassende Unterstützung im Fahrsimulator und meinem Zimmerkollegen Lars Woyna für die stets kritischen und hilfreichen Anmerkungen.

Das Gelingen einer Doktorarbeit ist nicht zuletzt vom Engagement der Studenten abhängig, bei denen ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken möchte. Stellvertretend für alle können hier leider nur diejenigen genannt werden, deren Beiträge unmittelbar in die Arbeit eingeflossen sind: Hanno Belz, Lars Clausen, Kai Deecke, Benjamin Franz, Daniel Hesse, Wolfram Isselmann, Phillipp Jacobus, Boris Kellersmann, Christoph Kuhnert, Lena Lange, Michael Neubert, Sinja Röbig, Nils Schader, Simon Schiesser, Dennis Schlesinger, Michael Schultheis, Anika Schulz, Sebastian Spengler, Martin Zademach.

Ebenfalls bedanke ich mich bei allen Probanden, die an meinen Versuchen teilgenommen haben.

Meiner Familie (Mariam und Jonathan) danke ich sehr für ihr Verständnis und ihre Geduld, die beide besonders in der letzten Phase der Promotion aufbringen musste. Letztlich bin ich meinen Eltern zutiefst dankbar, die mich auch in schweren Zeit immer unterstützt haben und ohne die ich nicht an diesem Punkt stünde.

Zusammenfassung:

Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer mittlerweile bei einer Vielzahl an Aufgaben im Fahrzeug und sollen so das Autofahren sicherer und komfortabler machen. Ein Dilemma, das sich bei der Implementierung dieser Systeme (die eine Interaktion mit dem Fahrer benötigen) abzeichnet, ist eine Überforderung des Fahrers durch eine parallele Bedienung dieser Systeme und der Kenntnis der einzelnen Systemgrenzen. Aus technischer Sicht ist eine Vernetzung einiger dieser Systeme möglich, die für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, aufgrund einer vereinheitlichten Bedienung, Vorteile aufweisen kann.

In der vorliegenden Arbeit wird auf der Grundlage eines von Winner & Heuss (2005) vorgestellten Ansatzes ein Interaktionskonzept für ein manöverbasiertes Fahrerassistenzsystem, das mehrere Funktionen heutiger und in naher Zukunft realisierter Fahrerassistenzsysteme beinhaltet, für den Nutzungskontext der Autobahn entwickelt, in einem Fahr-simulatoraufbau integriert und evaluiert. Der Fahrer interagiert bei diesem System über Manöverkommandos mit dem Fahrzeug und überlässt diesem die Ausführung der Manöver. Der Fahrer kann aber jederzeit die manuelle Kontrolle des Fahrzeuges übernehmen und das Fahrzeug mit Lenkrad und Pedalerie führen.

Die Entwicklung des Konzeptes der manöverbasierten Fahrzeugführung schließt die Entwicklung eines Manöverkataloges, der für die Interaktion verwendet wird, und die Entwicklung einer Manöverschnittstelle, mit der die Manöver beauftragt und überwacht werden können, mit ein. Die Identifikation der Manöver erfolgt anhand einer Literaturrecherche und eigener Laborversuche, sowie einer Frühevaluierung mit Hilfe der *Wizard of Oz*-Technik, bei der die Systemreaktion über einen menschlichen Operator simuliert wird. Dies ermöglicht eine Evaluation ohne eine aufwendige Erstellung des Assistenzsystems im Fahrsimulator.

Nach der Frühevaluierung erfolgen eine Überarbeitung und eine detaillierte Festlegung des Interaktionskonzeptes sowie die Entwicklung der Manöverschnittstelle. Beides wird im Fahrsimulator implementiert (z. B. Erstellung von einfachen Reglern für die Fahrmanöverausführung, Implementierung eines Head-Up-Displays, ...) und einer Evaluation unterzogen, um zum einen zu klären, ob eine Manöversteuerung prinzipiell für den Fahrer ausführbar ist, und zum anderen Gestaltungsvorschläge für Weiterentwicklungen abzuleiten. Die Evaluation erfolgt u. a. hinsichtlich der Aspekte der *Entlastung des Fahrers*, der Aufrechterhaltung der *Situation Awareness* und des *Interaktionsverhaltens* (z. B. Gebrauchstauglichkeit, Systemverständnis).

Die Ergebnisse zeigen, dass eine manöverbasierte Fahrzeugführung für die Autobahn prinzipiell möglich ist. Eine große Anzahl an Manövern wird von den Versuchspersonen beauftragt, und die Gebrauchstauglichkeit wird auf einem relativ hohen Niveau bewertet. Des Weiteren konnte eine körperliche Entlastung sowie eine zumindest nicht steigende mentale Belastung nachgewiesen werden. Eine Weiterentwicklung des Ansatzes wird empfohlen, und es werden Gestaltungsvorschläge hinsichtlich der Manöverschnittstelle (z. B. ein kontaktanaloges Head-Up-Display) und des Interaktionskonzeptes werden gegeben.

Abstract:

Today, drivers are assisted by a wide range of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) to make driving safer and more comfortable. Rather than operating a car manually, drivers are now required to monitor several assistance systems. This implies that the driver must have knowledge of the limits of every single system. From a technical perspective, it is possible to combine these individual ADAS through an integrated system and this could simplify driver-vehicle interaction. Based on the approach *Conduct-by-Wire* presented by Winner & Heuss (2005), a concept for maneuver-based driver-vehicle-interaction on freeways combining ADAS functions, which are available today or will be in the near future, was developed and evaluated in a static driving simulator. The driver interacts with the system via maneuver commands that are executed by the maneuver-based assistance system. The driver can reclaim manual control of the vehicle at any time, using the traditional interface of steering wheel and pedals.

Important components of the proposed concept are a set of maneuvers that drivers need to interact with the system as well as an interface to assigns and monitors the maneuvers. The identification of relevant maneuvers was based on literature research, as well as laboratory experiments. In addition, an early concept evaluation was carried out using the *Wizard of Oz*-Technique, whereby a human controller imitates the system's behavior. Thus, the behavior of the subjects can be analyzed, without having to set up the full assistance system within the driving simulator.

Based on the results of the *Wizard of Oz* study, the interaction concept was developed further. This also included the set-up and implementation of a maneuver interface, a head-up-display as well as ADAS functions (e.g. controllers that take longitudinal and lateral control of the vehicle). This prototype was evaluated to clarify if maneuver-based vehicle guidance is feasible from the driver's point of view, and to gain design recommendations for further improvements. In addition, the change in drivers workload, the maintenance of *Situation Awareness* as well as the general interaction behavior (e.g. usability, degree of system comprehension) were also assessed.

The results showed that maneuver-based vehicle guidance is feasible on freeways: The subjects assigned a high number of maneuvers and generally found the system useful. Furthermore, it was proven that the physical workload of drivers can be significantly reduced and that their mental workload is not affected by maneuver-based vehicle guidance. Further development of this interaction concept is recommended; design recommendations for the maneuver interface (e.g. contact analogue information in head-up-displays) and the interaction concept will be provided at the end of the thesis.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung	5
2.1	Die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion	5
2.2	Fahrerassistenzsysteme und neuartige Fahrzeugführungskonzepte für primäre Fahraufgaben	8
2.2.1	Fahrerassistenzsysteme	9
2.2.2	Kooperative Fahrzeugführungskonzepte	11
2.2.3	Teilautonome Fahrzeugführungskonzepte	14
2.3	Automatisierung und Manöverführung in anderen Bereichen der Technik	15
2.4	Chancen und Risiken der Automation von primären Fahraufgaben	16
2.4.1	Reduzierung der Beanspruchung des Fahrers durch Fahrerassistenzsysteme	18
2.4.2	Beeinträchtigung der Situation Awareness durch Automation . . .	20
2.4.3	Sicherheitskritisches Stabilisierungsverhalten bei einem Wechsel von Automationsstufen	22
2.4.4	Risikohomöostase und Mitzieheffekt	22
2.4.5	Mode Awareness und notwendige Rückübernahmen durch den Fahrer	23
2.4.6	Bedienbarkeit	25
3	Konzeption und Realisierung der manöverbasierten Fahrzeugführung	27
3.1	Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei der Nutzung einer manöverbasierten Fahrzeugführung	27
3.1.1	Anforderungen an ein Modell zur Beschreibung der manöverbasierten Fahrzeugführung	28
3.1.2	Modelle zur Beschreibung des Fahrerverhaltens	29
3.1.3	Modell der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei der Nutzung des manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes	41
3.2	Diskretisierung einer Autobahnfahrt in Manöver aus Sicht des Fahrers . .	44
3.2.1	Diskretisierungsansätze zur Einteilung von Fahrmissionen	45
3.2.2	Versuchsreihe: Entscheidungspunktanalyse	50
3.2.3	Konzept der expliziten und impliziten Fahrmanöver	55
3.3	Frühevaluation mit Hilfe der <i>Wizard of Oz</i> -Technik	57
3.3.1	Versuchskonzept und Versuchsdurchführung	58
3.3.2	Ergebnisse und Diskussion	60
3.4	Konzept manöverbasierte Fahrzeugführung	64
3.4.1	Festlegung des Funktionsumfangs für die manöverbasierte Fahrzeugführung	64
3.4.2	Festlegung der Interaktion für die Manöversteuerung	65
3.5	Erstellung der Fahrmanöver im Fahrsimulator	68
3.6	Manöverschnittstelle	69
4	Überprüfung der manöverbasierten Fahrzeugführung in einer Fahrsimulatorstudie	72
4.1	Untersuchungsziel und Hypothesen	72

4.2	Fahrsimulatoraufbau	75
4.3	Versuchsdesign	76
4.3.1	Messgrößen für die Evaluation	76
4.3.2	Detaillierung der Hypothesen	79
4.3.3	Probandenkollektiv	84
4.3.4	Versuchsstrecke	84
4.3.5	Versuchsablauf	87
4.4	Datenaufbereitung und Auswertungsmethodik	88
4.5	Ergebnisse	91
4.5.1	Allgemeine Ergebnisdarstellung der erfahrenen Fahrer ($N = 41$)	91
4.5.2	Allgemeine Ergebnisdarstellung „Novizen“ ($N = 15$)	109
4.5.3	Überprüfung der Hypothesen	117
4.6	Diskussion	123
5	Fazit und Ausblick	130
A	Zuordnung der Benennung der Entscheidungspunkte aus der retrospektiven Analyse zu den Manövern nach Nagel & Enkelmann (1991) bei der Entscheidungspunktanalyse aus Kapitel 3.2.2	146
B	Antworten der Versuchspersonen ($N = 31$) der <i>Wizard of Oz</i>-Studie aus Kapitel 3.3 auf die offene Frage „Hat Ihnen bei der Absolvierung der Fahrszenarios ein Manöver gefehlt?“	147
C	Fragebogen zum Systemverständnis	148
D	Versuchsstrecke 1	151
E	Versuchsstrecke 2	152

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
AF	Anforderung
ANOVA	einfaktorielle Varianzanalyse
AOI	Area of Interest (Interessensbereich)
df	Anzahl der Freiheitsgrade
ESP	Elektronisches Stabilitäts Programm
FS	Fahrstreifen
FSW	Fahrstreifenwechsel
KS	Prüfgröße des Lilliefors-Tests
LKAS	Lane Keeping Assistance System
N	Stichprobengröße
p	Signifikanzwert
SUS	System Usability Scale
t	Prüfgröße des t-Tests
WX	Prüfgröße des Wilcoxon-Tests
μ	Mittelwert
ρ	Pearson-Korrelationskoeffizient
σ	Standardabweichung
χ^2	Prüfgröße des Chi-Quadrat-Tests

1 Einleitung

Das moderne Kraftfahrzeug ist mit einer Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen ausgestattet, die den Fahrer in den verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung unterstützen. Durch Nachsichtssysteme wird der Fahrer beispielsweise bei der Informationsaufnahme unterstützt, einige Warnsysteme (z. B. Totwinkelwarner) unterstützen bei der Handlungsauswahl, und Spurhalteassistenten (*Lane Keeping Assistance Systems*, LKAS) helfen bei der Handlungsausführung. Es ist zu erwarten, dass der Funktionsumfang von Fahrerassistenzsystemen in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird (Dickmanns, 2002; Winner, 2009). Die Informationsverarbeitung der modernen Kraftfahrzeuge erreicht somit eine stetig wachsende Qualität und Vollständigkeit, so dass zukünftig ein gleichwertiger Partner zur Verfügung stehen kann, mit dem die Fahraufgabe gemeinsam erfüllt wird. Diese Art der Kooperation setzt allerdings voraus, dass die derzeitige Strategie der Implementierung von Einzelsystemen zugunsten eines übergeordneten Fahrerassistenzsystems (das die Funktionen der Einzelsystem zumindest zum Teil beinhaltet) aufgegeben wird. Ein solcher Strategiewechsel verändert auch die Rahmenbedingungen für die Mensch-Maschine-Interaktion, die an die neuen technischen Bedingungen angepasst werden muss. In dieser Arbeit wird eine mögliche zukünftige Ausprägungsform eines übergeordneten Fahrerassistenzsystems auf der Basis eines bestehenden Konzeptes nach Winner & Heuss (2005) entwickelt, in einer Simulationsumgebung aufgebaut und evaluiert. Ausgehend von der Problemstellung wird in diesem Kapitel darüber hinaus der Lösungsansatz und die Zielsetzung dargestellt sowie der Aufbau der Arbeit erklärt.

Problemstellung Ein Zielkonflikt, der sich bei der Implementierung von Fahrerassistenzsystemen, die eine Interaktion mit dem Fahrer verlangen, ergibt, ist die zeitlich parallele Bedienung dieser Systeme. Man stelle sich folgendes Beispiel vor: Ein Fahrzeug, das mit einem System zur automatischen Abstandsregelung zu vorausfahrenden Fahrzeugen (*Adaptive Cruise Control*, ACC) und einem Totwinkelwarner ausgerüstet ist, fährt auf einer zweifahrtstreifigen Autobahn auf dem rechten Fahrstreifen. Der Fahrer möchte einen Fahrstreifenwechsel nach links durchführen, hat dabei aber ein Fahrzeug links von ihm im toten Winkel nicht wahrgenommen. In diesem Augenblick vollzieht das vorausfahrende Fahrzeug eine Vollbremsung, und sowohl das aktive ACC als auch der Totwinkelwarner geben eine akustische Warnung an den Fahrer.

Dies wirft die Frage auf, ob die Nutzung von mehreren Fahrerassistenzsystemen überhaupt einen Vorteil für den Fahrer haben kann, besonders wenn der Fahrer Warnungen erst bestimmten Systemen zuordnen muss. In Untersuchungen von Buld *et al.* (2002, 2005), konnte gezeigt werden, dass die Fahrer, die eine Minimalversion eines Autopiloten (Kombination von LKAS und ACC) gefahren sind, besser abgewogen haben, in welchen Situationen sie das System aktivieren oder aktiviert lassen, als Fahrer, die ausschließlich ACC verwendet haben.

Die parallele Bedienung mehrerer Fahrerassistenzsysteme wird ebenfalls von Wolf *et al.* (2005a,b) untersucht, die als Lösungsvorschlag eine Priorisierung der Rückmeldungen vorschlagen, die allerdings, wie die obige Beispielsituation zeigt, nicht immer ausreichend ist, wenn bei einer Missachtung einer Warnung eine kritische Situation entsteht.

Die zeitlich parallele Bedienung hat neben dem gesteigerten Bedienaufwand zusätzlich den Nachteil, dass der Fahrer für jedes einzelne Fahrerassistenzsystem die Systemgrenzen kennen muss. Interagiert der Fahrer beispielsweise gleichzeitig mit einem ACC, einem LKAS und einem Totwinkelwarner, muss er die funktionalen Grenzen jedes Einzel-

systems kennen und bei einem Ausfall oder einer unerwartet auftretenden Systemgrenze entscheiden, welche Systeme er aktiviert lässt und welche er übersteuert. Wenn die Funktionen der verschiedenen Systeme miteinander vernetzt sind und es eine globale Systemgrenze für den Fahrer gibt, kann erwartet werden, dass sich das Systemverständnis des Fahrers (*Mode Awareness*; vgl. Kapitel 2.4.5) verbessert. Dies wird zusätzlich bestärkt durch die derzeitige Funktionsaufteilung. Heutige Fahrerassistenzsysteme sind in der Regel in Längs- und Querführung getrennt (Ausnahmen sind beispielsweise ESP oder ein vollautomatischer Parkassistent). Für den Fahrer sind Längs- und Querführung aber untrennbar miteinander verbunden (die Querbeschleunigung in einer Kurve wird durch den Lenkwinkel und die gewählte Geschwindigkeit determiniert). Untersuchungen zeigten, dass die Regelgüte mit kombinierten Bedienelementen für Längs- und Querführung (z. B. Sidesticks) besser ist als mit Lenkrad und Pedalen (Eckstein, 2000, 2001). Neben den leistungsbezogenen Größen zeigen Stanton & Young (1998) in einer Fahrersimulatoruntersuchung, dass bei der Nutzung eines Querführungsassistenten (LKAS) und eines ACC die Beanspruchungsreduktion am größten bei einer Kombination der beiden Systeme ist. ACC und LKAS als singuläres Fahrerassistenzsystem zeigten in diesen Versuchen keine Reduktion der Beanspruchung.

Lösungsansatz Auf der Grundlage der Veröffentlichungen von Winner & Heuss (2005) und Winner *et al.* (2006) wird in dieser Arbeit ein Prototyp einer Bahnführungsinteraktion über Manöverkommandos entwickelt. Ziel ist die Integration der Funktionen mehrerer Fahrerassistenzsysteme in ein einheitliches Interaktionskonzept mit einem einheitlichen Bedienelement. Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf dem Interaktionskonzept. Ohne die Fahrerassistenzfunktionen und eine Manöverschnittstelle kann allerdings keine Evaluation erfolgen. Daher müssen diese Aspekte in die Betrachtung zumindest zum Teil mitaufgenommen werden.

Ein Risiko, das bei einer solch weitreichenden Automatisierung der Fahraufgabe auftreten kann, ist der Rückzug des Fahrers aus der Fahrzeugführungsaufgabe. Aus der Flugführung ist bekannt, dass Piloten die über einen längen Zeitraum nur als Überwacher fungieren, eine niedrige Daueraufmerksamkeit haben und somit in kritischen Situationen Probleme bei einer Rückübernahme haben (Parasuraman *et al.*, 1993).

Bei der manöverbasierten Fahrzeugführung soll diesem Effekt durch die Interaktion auf *Bahnführungsebene* entgegengewirkt werden. Der Fahrer hat in gewissen Zeitabständen Entscheidungen zu treffen und kann sich somit nicht vollkommen von der Fahrzeugführungsaufgabe zurückziehen (ein ähnlicher Ansatz wird von Schaller *et al.*, 2008 bei der Entwicklung eines Stauassistenten verfolgt). Da dies ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit ist, wird bei der Evaluation des Prototypen detailliert auf die Anzahl der beauftragten Manöver eingegangen.

Aufbau der Arbeit Im Anschluss an die Einleitung werden in Kapitel 2 „Stand der Technik“ bestehende Konzepte dargestellt und verglichen. In diesem Forschungsgebiet liegt aus Mangel an Studien zu teilautonomen Fahrzeugführungskonzepten jedoch kaum Literatur vor. Daher wird die Recherche auch auf die technischen Bereiche Flugführung und Robotik ausgeweitet. Das Vorgehen für die Entwicklung des Prototypen einer manöverbasierten Fahrzeugführung orientiert sich am strukturierten Vorgehen für die Entwicklung und Evaluation der Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Fahrerassistenzsystems (vgl. Abb. 1) nach Schmidt *et al.* (2008). Ausgangspunkt für die Erstellung eines

Interaktionskonzepts (vgl. Kapitel 3) ist die Erstellung eines Modells der manöverbasierten Fahrzeugführung sowie die Erstellung eines Manöverkataloges, der für die Interaktion unerlässlich ist. Der Manöverkatalog leitet sich aus bekannten Diskretisierungsansätzen von Fahrmissionen und eigenen Versuchen (Entscheidungspunktanalyse aus Kapitel 3.2.2) ab. Aus den Manöverwünschen, die in den Versuchen erfasst worden sind, werden im Anschluss Funktionen und insbesondere ein Basisinteraktionskonzept definiert. Da die Reaktionen auf einen Interaktionsprototypen einer manöverbasierten Fahrzeugführung kaum antizipierbar sind und es aufgrund des sehr frühen Entwicklungsstadiums nicht unwahrscheinlich ist, dass der erste Prototyp weitreichend geändert werden muss, wird, wie bei Schmidt *et al.* (2008) vorgeschlagen, ein *Wizard of Oz*-Experiment durchgeführt (vgl. Kapitel 3.3). Dabei werden die Systemreaktionen, ohne dass es der Proband weiß, von einem menschlichen Operateur (dem *Wizard*) simuliert. Auf der Basis der Ergebnisse dieses Experimentes ist der überarbeitete Funktionsumfang in einem Fahr Simulator umgesetzt worden. Des Weiteren ist eine Manöverschnittstelle entwickelt, gebaut und an den Fahr Simulator angebunden worden. Dieser erste technische Prototyp ist in zwei Versuchsreihen mit identischem Versuchskonzept, aber unterschiedlichen Versuchspersonen (1. Versuchsreihe: Erfahrene Fahrer $N = 41$; 2. Versuchsreihe: Novizen $N = 15$) untersucht worden (vgl. Kapitel 4). Die Ergebnisse werden anschließend diskutiert, und es werden Gestaltungsempfehlungen (vgl. Kapitel 5) für die Weiterentwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung gegeben.

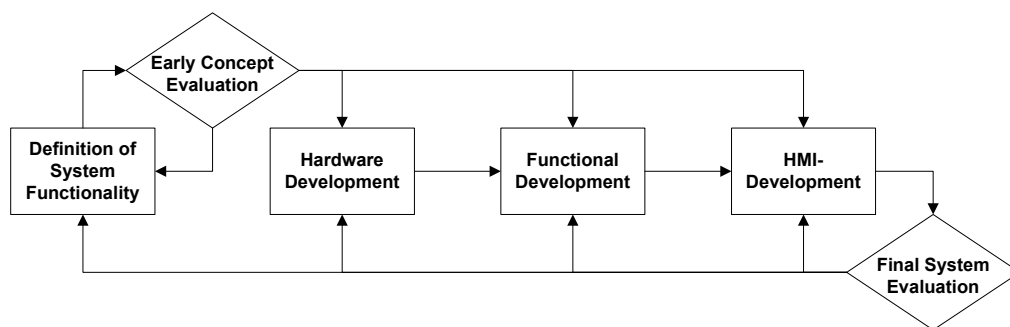


Abbildung 1: Strukturiertes Vorgehen bei der Entwicklung und Evaluierung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle eines Fahrerassistenzsystems nach Schmidt *et al.* (2008)

Die technische Zuverlässigkeit und funktionale Vollständigkeit eines manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes wird in dieser Arbeit nicht behandelt. Es sei auf die Forschungsarbeiten am *Fachgebiet Fahrzeugtechnik* zum DFG-Projekt *Conduct-by-Wire* verwiesen, die eine technische Umsetzung durch eine *Software in the Loop*-Simulation vorbereiten (Hakuli *et al.*, 2009a, 2010a) und damit auch eine Abschätzung über die Zuverlässigkeit machen werden.

Zielsetzung Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist es, die Machbarkeit einer Bahnführungsassistenz anhand von Manöverkommandos auf Autobahnabschnitten aus Sicht des Fahrers zu zeigen, und die möglichen Vorteile und Risiken dieses Fahrzeugführungskonzeptes darzulegen. Die Akzeptanz und die Veränderungen der Fahrfreude werden in anderen Forschungsarbeiten untersucht (vgl. Kauer *et al.*, 2010a). Das Autobahnzenario ist ausgewählt worden, da eine Umsetzung dort aufgrund der gut strukturierten Umwelt am wahrscheinlichsten erscheint.

Die übergeordneten Ziele könne in Unterziele aufgeteilt werden und sind im Folgenden formuliert.

1. Die Fahrzeugführung soll für den Fahrer auf *Bahnführungsebene/ Manöverebene* für Autobahnabschnitten durchführbar sein.
2. Die manöverbasierte Fahrzeugführung soll zu einer Reduktion der Fahrerbeanspruchung führen.
3. Die Fusion von Fahrerassistenzsystemen und deren Funktionen soll durch ein geeignetes Fahrzeugführungskonzept begleitet werden.
4. Durch eine häufige Interaktion auf *Bahnführungsebene* über Manöverkommandos und Parameteränderungen hinsichtlich der Ausführung dieser Manöver soll der Fahrer in der Fahrzeugführungsaufgabe eingebunden bleiben und so in der Lage sein, in kritischen Situationen die Kontrolle des Fahrzeugs zu übernehmen.
5. Der Fahrer soll den zugewonnenen Funktionsumfang durch die manöverbasierte Fahrzeugführung nicht für eine Erhöhung seiner Risikobereitschaft im Straßenverkehr verwenden (Risikohomöostase).
6. Es soll ein gebrauchstaugliches Fahrerassistenzsystem erstellt werden, das die Versuchspersonen sicher bedienen können.
7. Es sollen Gestaltungshinweise für die Weiterentwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung abgeleitet werden.

2 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung beginnt mit einer Darstellung der grundsätzlichen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion (vgl. Kapitel 2.1). Es werden zwei Modelle gezeigt, die beide geeignet sind, die Fahrzeugführung mit und ohne Fahrerassistenzsysteme darzustellen.

Die manöverbasierte Fahrzeugführung baut auf vielen bestehenden Fahrerassistenzsystemen und neuartigen Fahrzeugführungskonzepten auf. Eine Auswahl wird in Kapitel 2.2 vorgestellt. In Kapitel 2.2.2 wird das *Conduct-by-Wire*-Konzept dargestellt, das die Grundlage für die Entwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung dieser Arbeit ist. Da im Bereich der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion noch keine manöverbasierten Führungskonzepte existieren, wird die Recherche in Kapitel 2.3 auf andere Bereiche der Technik ausgeweitet. In Kapitel 2.4 werden schließlich die Chancen und Risiken von Automatisierung in der Fahrzeugführung aufgezeigt.

2.1 Die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

Die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion kann anhand einer Vielzahl von Modellen beschrieben werden, die in Abhängigkeit vom Anwendungsgebiet und der Fragestellung ausgewählt werden. Soll beispielsweise die Regelungsaufgabe des Fahrers beim Führen eines Fahrzeugs dargestellt werden, kann auf die Kompensationsregelung nach Johannsen (1976) zurückgegriffen werden. Sollen Risikoabwägungen des Fahrers erklärt werden, kommen Modelle von Wilde (1982) oder Fuller (1984) in Betracht. Wird auf Fahrerassistenzsysteme fokussiert, können Informationsflussdiagramme (Kidd & Laughery, 1964) verwendet werden. In Kapitel 3.1.2 werden im Zusammenhang mit der Erstellung eines eigenen Modells weitere Modelle detailliert vorgestellt, die für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit einer manöverbasierten Fahrzeugführung relevant sind.

Eine häufig verwendete Darstellung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion sind regelungstechnische Diagramme, die durch ihre kontinuierliche Beschreibungsart meist auf die Regulierung von Bedienelementen fokussieren. Exemplarisch wird das Modell nach Johannsen (1976) vorgestellt, das in Abb. 2 dargestellt ist.

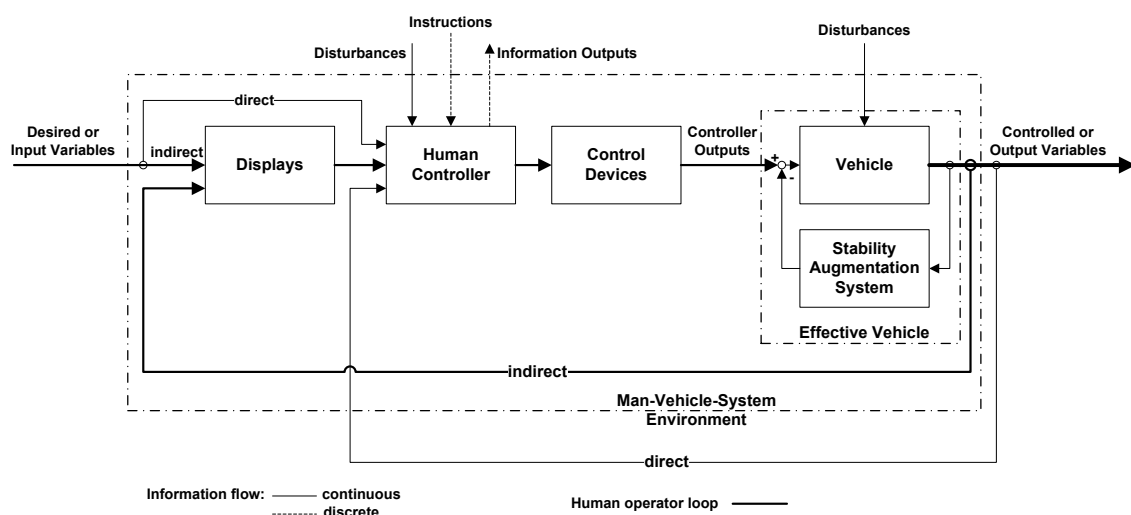


Abbildung 2: Regelungstechnische Darstellung der Interaktion eines Operators mit einem Fahrzeug (nicht zwingend auf das Kraftfahrzeug bezogen) nach Johannsen (1976)

Der Fahrer (*Human Controller*) erhält indirekt über eine Anzeige (*Display*) und direkt durch die Reaktion des Gesamtsystems (*Output Variables*) Informationen über den aktuellen Systemzustand und gleicht diese mit seinen Sollgrößen ab (*Desired or Input Variables*). Eine Änderung des Gesamtsystems kann der Fahrer durch Lenkrad und Pedalerie (*Control Devices*) veranlassen, deren Anpassung über das Fahrzeug wieder an den Fahrer zurückgemeldet wird.

In Abb. 2 ist ebenfalls ein in die Regelung eingreifendes Assistenzsystem (*Stability Augmentation System*) eingebettet. Die Darstellung ist ursprünglich für die Flugführung entwickelt worden und bezieht sich beispielsweise auf eine automatische Trimmung. Auf die Fahrzeugführung übertragen könnte hier ein Fahrerassistenzsystem auf *Stabilisierungsebene* abgebildet werden, wie die Antriebsschlupfregelung (ABS).

Die manöverbasierte Fahrzeugführung, die in dieser Arbeit vorgestellt wird, baut in wesentlichen Teilen auf dem *Conduct-by-Wire*-Konzept nach Winner & Heuss (2005) auf. Dieses Konzept ist anhand der Drei-Ebenen-Darstellung nach Donges (1982) entwickelt worden. Die Darstellung nach Donges (1982) spielt daher für diese Arbeit eine entscheidende Rolle.

Im Folgenden wird die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion über das Modell von Donges (1982), das in Abb. 3 dargestellt ist, vorgestellt. Eine Erweiterung des Modells nach Donges (1982) durch Winner & Heuss (2005) und Winner *et al.* (2006) wird in Kapitel 2.2.2 gezeigt.

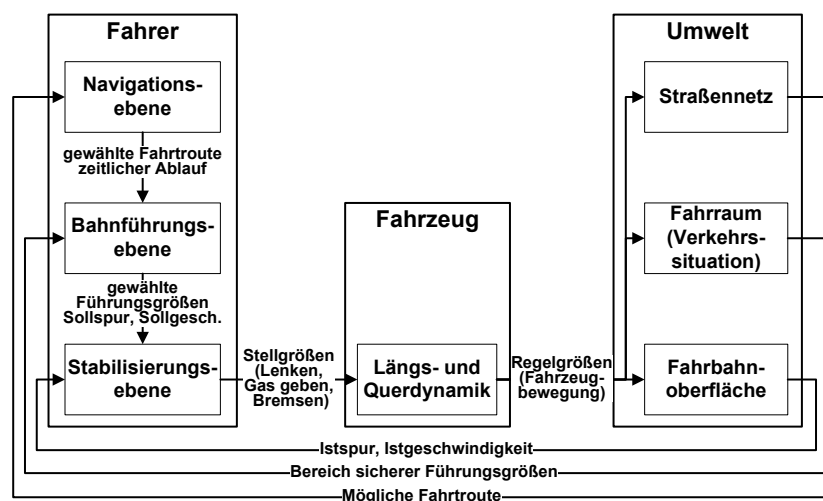


Abbildung 3: Drei-Ebenen-Darstellung der Fahrzeugführung nach Donges (1982)

Ausgehend von einer Transportmission wählt der Fahrer auf Navigationsebene eine Fahrtroute und einen Zeitplan für die Absolvierung (zeitlicher Ablauf) der Fahrstrecke. Auf der Basis dieser festgelegten Route wird auf *Bahnführungsebene* eine Bahnplanung für die gerade vorherrschende Verkehrssituation erstellt. Dazu gehört ein den Umgebungs-umständen angepasster Weg (Sollspur) und eine entsprechende Geschwindigkeit (Sollgeschwindigkeit). Auf der untersten Ebene schließlich wird die gewählte Trajektorie in Stabilisierungsbefehle (Stellgrößen) umgesetzt und über Lenkrad und Pedalbetätigung an das Fahrzeug übergeben. Dies verdeutlicht, dass Bahnführungsentscheidungen bei konventioneller Fahrzeugführung nur über die *Stabilisierungsebene* kommunizierbar sind.

Die Fahrereingaben über die Bedienelemente resultieren in einer Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs, die schließlich auf die Umwelt (Straßennetz, Verkehrssituation und Fahrbahnoberfläche) wirkt. Von der Umwelt werden verschiedene Informationen, wie die aktuelle Trajektorie (Istspur und Istgeschwindigkeit), der Bereich sicherer Führungsgrößen oder alternative Fahrtrouten, an den Fahrer zurückgeführt. Hinsichtlich der Bedienelemente ist die heutige Fahrer-Fahrzeug-Interaktion nach wie vor stark von Lenkrad und Pedalerie bestimmt. Alternative Bedienelemente wie Sidesticks (vgl. Eckstein, 2001) haben es trotz vielversprechender Ergebnisse nicht über den Forschungsstand hinausgebracht. Die meisten Fahrzeugführungsmodelle sind mehr als 15 Jahre alt. Daher bilden diese Modelle auch nur selten Fahrerassistenzsysteme ab. Ein weitsichtiger Ansatz wurde von Johannsen (1976) veröffentlicht, der neben der in Abb. 2 dargestellten Mensch-Fahrzeug-Interaktion ohne Assistenzsysteme bereits im Jahr 1976 dieses Modell um eine Automation erweiterte (vgl. Abb. 4). Der Block Fahrzeug (*Vehicle*) ist in den beiden Modell von Johannsen (1976) aber nicht zwingend auf das Auto bezogen.

Die Darstellung des Modells mit Assistenzsystemen unterscheidet sich durch das Systemelement *Automatic Controller*, das die kontinuierliche Regelung der Fahrzeugführungsaufgabe übernimmt. Der Fahrer hat immer noch die Möglichkeit, Einfluss auf das Gesamtsystem zu nehmen, indem er über ein Bedienelement diskrete Signale an den *Automatic Controller* übergibt. Dies sind in der Regel Sollwertvorgaben für den oder die Regler. Im Fall der Fahrzeugführung könnte dies beispielsweise eine Veränderung der Wunschgeschwindigkeit bei der Nutzung eines Tempomaten sein. Der *Automatic Controller* stellt aber auch dem Fahrer Informationen zur Verfügung. Im Fall des Tempomaten könnte beispielsweise die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit angezeigt werden.

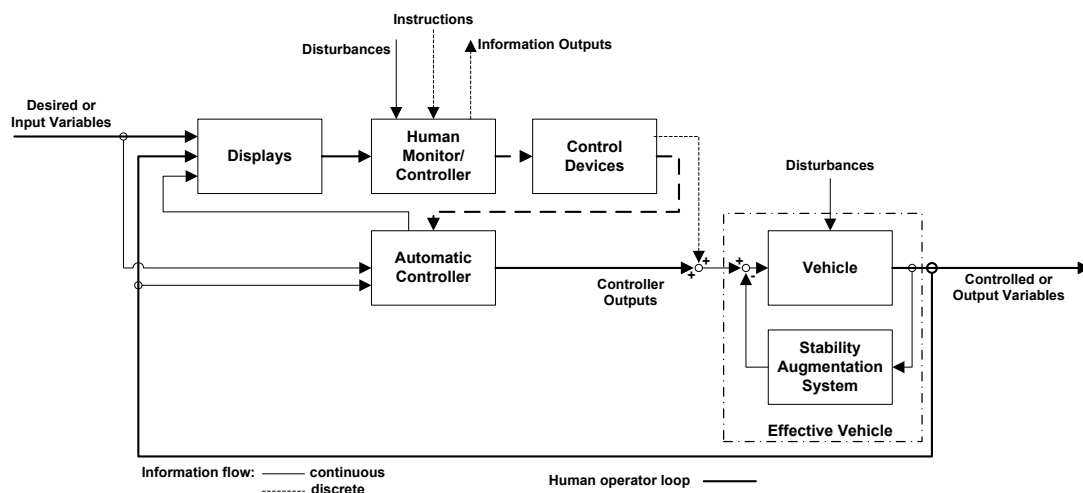


Abbildung 4: Darstellung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit Assistenzsystemen in einem regelungstechnischen Diagramm nach Johannsen (1976)

Würde man beide Modelle (aus Abb. 2 und Abb. 4) kombinieren, könnte man darüber hinaus die Aktivierung und Deaktivierung der Assistenzsysteme darstellen (dieser Ansatz wird in Kapitel 3.1.3 vorgestellt).

Nach Johannsen (1976) kann demnach definiert werden, dass durch eine Automation der Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug von einer kontinuierlichen in eine diskrete Form überführt wird, die Regelungsaufgabe an die Automation delegiert wird und der Fahrer durch die Automation über den Systemzustand informiert wird.

2.2 Fahrerassistenzsysteme und neuartige Fahrzeugführungskonzepte für primäre Fahraufgaben

Die Idee, primäre Fahraufgaben vom Fahrer auf das Fahrzeug zu übertragen, ist nicht neu. Schon in den fünfziger Jahren stellte *General Motors* ein Konzept zur automatischen Fahrzeugsteuerung für Autobahnen vor (General Motors, 1959). Durch in den Fahrweg eingelassene metallische Leitungen sollte es dem Fahrzeug (in diesem Fall dem Forschungsfahrzeug *Firebird II*) mit entsprechender Technik möglich sein, die Querführung zu übernehmen.

Der erste Meilenstein in der Fahrerassistenzsystementwicklung in Bezug auf automatisierte Fahrzeugführungskonzepte der primären Fahraufgabe war die Einführung des Tempomaten (engl. *Cruise Control*) durch *Chrysler* im Jahre 1959 (Rowsome, 1958). Zum ersten Mal war ein Teil der Fahrzeugregelung (in diesem Fall die Längsführungsregelung) einem technischen System übertragbar. Viele Assistenzsysteme sind bis zum heutigen Tag hinzugekommen, was in den letzten Dekaden durch die Entwicklung des Computers noch beschleunigt wurde.

Wegen der großen Zahl an Fahrerassistenzsystemen muss hier auf eine vollständige Darstellung verzichtet werden. Für detaillierte Informationen zu Fahrerassistenzsystemen wird auf das *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* von Winner *et al.* (2009b) verwiesen.

Die im Folgenden dargestellte Auswahl beschränkt sich auf Systeme, die eine direkte Voraussetzung oder konzeptionelle Ähnlichkeit mit einer manöverbasierten Fahrzeugführung besitzen. Eine Systematisierung der Systeme kann durch Tab. 1 erfolgen. Anhand der Klassifikationsmerkmale, ob Systeme für spezielle oder alle Situationen ausgelegt sind und ob nur Teile der primären Fahraufgabe oder die gesamte Fahrzeugführung von einem System übernommen werden, ergeben sich vier Kombinationsmöglichkeiten. Unterschieden wird in Fahrerassistenzsysteme, kooperative Systeme, teilautonome Systeme und autonome Fahrzeuge. Heutige Fahrerassistenzsysteme sind in mehreren Ebenen in ihrem Nutzungsbereich eingeschränkt. Zum einen sind die Systeme nur für bestimmte Nutzungsszenarios ausgelegt. Die Funktionalität eines ACC ist auf Autobahnen mittlerweile beachtlich, im Stadtverkehr zeigen sich allerdings Defizite (Didier *et al.*, 2008). Daher werden oft als Nutzungsbereich gut ausgebaute Landstraßen und Autobahnen in den Betriebsanleitungen angegeben (Bayrische Motoren Werke, 2008). Zum anderen werden nur Teile der Fahraufgabe übernommen. Ein ACC übernimmt lediglich die Längsführung des Fahrzeugs. Der nächste Schritt sind integrierte Längs- und Querführungssysteme, die

	Ausgelegt für spezielle Situationen	Ausgelegt für alle Situationen
Übernimmt Teile der primären Fahraufgabe	Fahrerassistenzsysteme (kooperative Systeme)	kooperative Systeme
Übernimmt die ganze primäre Fahraufgabe	teilautonome Systeme	autonome Fahrzeuge

Tabelle 1: Systematisierung von Fahrerunterstützungssystemen, die primäre Fahraufgaben übernehmen

als teilautonome Systeme definiert werden. Neben dem autonomen Parkassistenten ist der Stauassistent wahrscheinlich das nächste System, das diese Funktionalität für den öffentlichen Straßenverkehr bietet. Diese Systeme übernehmen die gesamte primäre Fahraufgabe zumindest auf der Ebene der Handlungsausführung.

Weitreichender werden Fahrer durch kooperative Systeme unterstützt, die dem Fahrer im Gegensatz zu den anderen Fahrzeugführungskonzepten auch Aktionen vorschlagen (Hakuli *et al.*, 2009b). Diese Systeme sollen langfristig außerdem für gesamte Fahrmissionen verwendet werden, und nicht nur auf bestimmte Nutzungsszenarios oder gar Situationen beschränkt sein.

Im Folgenden werden einzelne Systeme und Gestaltungslösungen in den Kapitel Fahrerassistenzsysteme (vgl. Kapitel 2.2.1), kooperative Systeme (vgl. Kapitel 2.2.2) und teilautonome Systeme (vgl. Kapitel 2.2.3) vorgestellt. Autonome Fahrzeuge werden nicht betrachtet, da dort der Fahrer gänzlich aus der Regelung und Steuerung des Fahrzeugs entfernt ist und die Mensch-Maschine-Schnittstelle von vergleichsweise untergeordneter Bedeutung ist.

2.2.1 Fahrerassistenzsysteme

In diesem Kapitel werden bestehende Fahrerassistenzsysteme beschrieben, die für einen längeren Zeitbereich Teile der primären Fahrzeugführungsaufgabe übernehmen oder Entscheidungen auf *Bahnführungsebene* beeinflussen und somit die Grundlage für ein manöverbasiertes Fahrzeugführungskonzept sind. Systeme, die den Fahrer in kritischen Situationen unterstützen, so wie ESP, der Notbremsassistent (z. B. das *Pre Safe*-System von Daimler, vgl. Breuer, 2009) oder Notausweichsysteme wie *PRORETA* (Bender *et al.*, 2007a,b), sind für die technische Entwicklung unerlässliche Quellen für Fahrfunktionen, werden aber für einen ersten Prototypen der Mensch-Maschine-Interaktion nicht zwingend benötigt und daher ebenfalls von der Betrachtung ausgeschlossen.

Die funktionale Analyse der Fahrerassistenzsysteme sowie die Überprüfung, welche Funktionen für einen Bahnführungsassistenten nötig sind, wird am *Fachgebiet Fahrzeugtechnik* der TU Darmstadt erforscht (weiterführende Informationen können in Hakuli *et al.*, 2009a und Hakuli *et al.*, 2010a gefunden werden).

Tempomat Der Tempomat wurde Ende der 1950er Jahre von Chrysler (Rowsome, 1958) eingeführt und übernimmt die Regelung auf eine vom Fahrer gesetzte Wunschgeschwindigkeit. Heute wird der Tempomat in sehr vielen Fahrzeugen angeboten, eine hohe Marktdurchdringung ist allerdings eher in Nordamerika und Japan zu beobachten (Winner, 2009).

Beim Tempomat hat der Fahrer wenige Einstellmöglichkeiten. Er kann das System aktivieren und deaktivieren, wobei die meisten Hersteller eine Mindestgeschwindigkeit für die Aktivierung des Systems voraussetzen. Während der Tempomat die Fahrgeschwindigkeitsregelung übernimmt, kann der Fahrer in der Regel die Wunschgeschwindigkeit erhöhen oder verringern. Das System wird entweder durch eine Taste oder die Betätigung der Bremse deaktiviert, während eine Eingabe auf dem Gaspedal bei den meisten Systemen zu einer Degradierung führt. Solange der Fahrer das Gaspedal betätigt, ruht die Regelung des Tempomaten. Geht der Fahrer vom Gaspedal, nimmt der Tempomat mit der zuletzt gespeicherten Wunschgeschwindigkeit seine Regelung wieder auf.

Adaptive Cruise Control Die ISO-15622 (2002) beschreibt die ACC-Funktionen als „[a]n enhancement to conventional cruise control systems, which allows the subject vehicle to follow a forward vehicle at an appropriate distance by controlling the engine and/or power train and potentially the brake“. Die Funktionalität des eben beschriebenen Tempomaten ist in ACC enthalten. Darüber hinaus erfolgt eine Geschwindigkeitsanpassung des Ego-fahrzeugs (das vom Fahrer zu führende Fahrzeug) an die Geschwindigkeit des unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs durch einen Zugriff auf den Motor und unter Umständen auf die Bremse. Eingeführt wurde das System im Jahre 1995 in Japan durch *Mitsubishi*, das erste Serienfahrzeug mit ACC in Deutschland wurde von *Mercedes-Benz* im Jahr 1999 vorgestellt.

Die Einstellmöglichkeiten sind weitreichender als die beim Tempomaten, unterscheiden sich aber kaum zwischen den Herstellern. Es gibt wie beim Tempomaten eine Möglichkeit, das System an- und auszuschalten. Die Aktivierung erfolgt abhängig vom Hersteller entweder über eine Taste auf dem Lenkrad (eher in Japan und Nordamerika zu finden) oder über eine Betätigung eines ACC-Lenkstockhebels (eher in Deutschland zu finden). Die Deaktivierung erfolgt wie beim Tempomaten durch das Betätigen eines ACC-Bedienelementes oder des Bremspedals. Ebenfalls kann die Wunschgeschwindigkeit (die Geschwindigkeit, auf die das System bei freier Fahrt beschleunigen soll) eingestellt werden. Zusätzlich kann in mehreren Stufen der Abstand zum Vorausfahrenden eingestellt werden. Da der Abstand bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auch unterschiedlich hoch ausfallen muss, wird dies über eine Zeitlücke eingestellt. Die Zeitlücke bezeichnet die Zeitspanne, in der zwei aufeinander folgende Fahrzeuge einen bestimmten Punkt passieren. Bei dem ACC von BMW (5er Baureihe, Baujahr 2007) lässt sich die Zeitlücke in vier Stufen von 1 s bis 2,5 s einstellen (Pasenau *et al.*, 2007). Weiterführende Informationen zu ACC sind bei Winner *et al.* (2009a) zu finden.

Lane Keeping Assistant System Grundsätzlich muss bei den Spurhaltesystemen in warnende (Lane Departure Warning, LDW) und eingreifende Systeme (*Lane Keeping Assistant System*, LKAS) unterschieden werden. Für eine manöverbasierte Fahrzeugführung, die den Fahrer von Stabilisierungsaufgaben entlasten soll, ist das LKAS von größerer Bedeutung. Das LDW wird daher nicht weiter betrachtet.

Beim LKAS handelt es sich um ein System mit einer unterstützenden elektrischen Lenkhilfe (Gayko, 2005). Das System erfasst die Fahrbahnmarkierungen, die Position und Orientierung des Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens. Aus diesen Größen wird das Zusatzmoment des LKAS berechnet, das den Fahrer über die Bewegungen am Lenkrad bei der Stabilisierung im Fahrstreifen unterstützt. Im Bereich der Fahrstreifenmitte ist das Moment sehr gering und wird vom Fahrer kaum bewusst wahrgenommen. Nähert sich das Fahrzeug dem Rand des Fahrstreifens, wird das Moment größer und stellt somit eine haptische Rückmeldung an den Fahrer dar (Gayko, 2005). Mittlerweile werden LKAS angeboten, die in gewissen Grenzen im Hinblick auf den Fahrerwunsch parametrierbar werden können. Der Audi *Active Lane Assist* bietet dem Fahrer zwei Stufen der Fahrstreifenhalteunterstützung an (Freyer *et al.*, 2010; Biffar *et al.*, 2010). In der Einstellung „spät“ erfolgt der Lenkeingriff durch das System erst kurz vor dem Überfahren der Fahrstreifenmarkierungen. Der Fahrer kann aber auch die Einstellung „früh“ wählen und erhält eine kontinuierliche Unterstützung bei der Stabilisierung in der Fahrstreifenmitte.

Sowohl das System von Honda als auch der Audi *Active Lane Assist* funktionierten nur unter der Voraussetzung, dass der Fahrer die Hände am Lenkrad hat und somit weiterhin in die Stabilisierung des Fahrzeugs miteingebunden ist.

Fahrstreifenwechselassistent Zwischen den Jahren 1985 und 1999 lag der Anteil an Unfällen bei Fahrstreifenwechseln bei durchschnittlich mehr als 5 % (Bartels *et al.*, 2009). Die Automobilindustrie hat darauf mit der Entwicklung von Systemen reagiert, die Warnung vor Fahrzeugen im toten Winkel und vor sich von hinten annähernden Fahrzeugen geben. Wird vom Fahrer ein Fahrstreifenwechsel durchgeführt, und der Zielfahrstreifen ist nicht frei, wird der Fahrer beispielsweise durch eine Lampe im jeweiligen Seitenspiegel gewarnt. Viele Hersteller bieten mittlerweile solche Systeme an. Eine aktuelle Übersicht ist bei Bartels *et al.* (2009) zu finden. Für die Entwicklung einer manöverbasierten Fahrzeugführung können solche Systeme sehr hilfreich sein. Wird beispielsweise ein Fahrstreifenwechsel vom Fahrer beauftragt, könnte das System den Wechsel unterbinden oder zumindest den Fahrer warnen, falls der Zielfahrstreifen nicht frei ist.

2.2.2 Kooperative Fahrzeugführungskonzepte

Aufgrund der Weiterentwicklung und der steigenden Anzahl von Fahrerassistenzsystemen wird an Konzepten zur Integration mehrerer Fahrerassistenzfunktionen in neue Mensch-Maschine-Interaktionen gearbeitet. Der Ansatz der kooperativen Fahrzeugführung wird in den Forschungsprojekten *H-Mode* und *Conduct-by-Wire* erforscht (Hakuli *et al.*, 2009b). Unter Kooperation wird dabei eine gemeinsame Willensbildung durch Fahrer und Fahrzeug verstanden. Ein Fahrprozess wird von einem der beiden Partner initialisiert und von dem jeweils anderen adaptiert, parametrisiert, oder ihm wird bei unterschiedlichen Zielvorstellungen entgegengewirkt.

Im Folgenden werden beide Ansätze, *H-Mode* und *Conduct-by-Wire*, sowie weitere kooperative Ansätze der Fahrzeugführung dargestellt.

H-Mode Anhand einer Design-Metapher (der *Horse-Metapher*) wird das von Flemisch *et al.* (2003) vorgeschlagene Fahrzeugführungskonzept *H-Mode* entwickelt, das sich für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion am Reiten eines Pferdes orientiert. Diese Design-Metapher wurde schon zu Beginn der 1990er Jahre für die Entwicklung von semiautomatischen Rollstühlen verwendet (Connell & Viola, 1990). Der Fahrer wird von einer Assistenz unterstützt, die in einer gemeinsamen Willensbildung (Fahrer und *H-Mode*) die Fahrtrajektorie definiert. Dieses Fahrzeugführungskonzept kann in verschiedenen Automationsstufen betrieben werden. Im Modus „Loose Rein“ (lose Zügel) ist nach Flemisch *et al.* (2003) ein hoch automatisierter Zustand hergestellt, während im „Tight Rein“ (feste Zügel) die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug im Bereich des assistierten Fahrens anzusiedeln ist. Die Analogie zu den Zügeln zeigt, dass großen Wert auf die haptische Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug gelegt wird, die in keiner der Modi unterbrochen werden soll. Damit soll dem *Driver Out of the Loop*-Problem, einem Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe (vgl. Kapitel 2.4), entgegengewirkt werden, wie Flemisch *et al.* (2008) für ein Szenario im Fahr Simulator mit unvorhersehbaren Systemausfällen qualitativ zeigen konnte.

Als Mensch-Maschine-Schnittstelle werden in der Regel aktive Sidesticks verwendet. Ebenfalls wird eine Kombination von aktivem Lenkrad und Pedalen in die Betrachtung miteingeschlossen. Die Bedienelemente dienen neben der Fahrzeugführung als Vermittler zwischen dem Fahrerwunsch und dem Vorschlag des *H-Mode*-Systems. Der Prozess der Vermittlung wird *Arbitrierung* genannt und ist in Flemisch *et al.* (2003) näher erläutert. In *H-Mode* sind manöverbasierte Anteile enthalten. Die Automation stellt kontinuierlich einen Baum mit möglichen Manövern auf, denen jeweils eine Kenngröße (das *Valenzial*)

zugeordnet ist. Das Manöver mit dem größten Valenzial ist das von der Automation zum gegenwärtigen Zeitpunkt präferierte Manöver (Löper & Flemisch, 2009). Die Gliederung der Manöver orientiert sich allerdings an den Anforderungen der Automation, da diese die Manöver für die Erfüllung der Fahrsituation bereitstellen muss. Eine diskrete Beauftragung der Manöver ist nicht implementiert. Wenn der Fahrer einen Fahrstreifenwechsel durchführen möchte, muss das Bedienelement in die für einen Fahrstreifenwechsel nötige Position gesteuert werden, bis die *H-Mode*-Interaktion den Fahrerwunsch interpretiert hat. Erst dann stellt sich die Automation auf den neuen Fahrstreifen ein. Die Übergabe der Steuerbefehle erfolgt somit weiter auf *Stabilisierungsebene*.

Die beiden Automationsstufen „früh“ und „spät“ des LKAS von Audi (Freyer *et al.*, 2010), das in Kapitel 2.2.1 vorgestellt wurde, erinnern an die Automationsstufen „Tight rein“ und „Loose rein“ des *H-Mode*-Konzepts nach Flemisch *et al.* (2003). Die Idee einer wählbaren Intensität der Unterstützung ist somit in einem Serienfahrzeug bereits umgesetzt.

Conduct-by-Wire Motivation für die Entwicklung des Konzeptes *Conduct-by-Wire* ist die steigende Zahl an Fahrerassistenzsystemen und der damit steigenden Bedienkomplexität (Winner & Heuss, 2005). Hervorgerufen wird diese Komplexität durch eine steigende Anzahl an Bedienelementen sowie den ständigen Wechsel der Bedienung verschiedener Fahrerassistenzsysteme, für die der Fahrer ein eigenes mentales Modell aufbauen muss. Insgesamt spricht Winner & Heuss (2005) von einer eingeschränkten Bedientransparenz. Um dieses Problem zu lösen, schlägt Winner & Heuss (2005) das *Conduct-by-Wire*-Konzept vor, bei dem alle stabilisierenden Aufgaben an das Fahrzeug übertragen werden und der Fahrer im Wesentlichen nur Bahnführungskommandos an das Fahrzeug übergibt. Der Fahrer konzentriert sich somit auf die Führung des Fahrzeugs, nicht auf dessen Stabilisierung. In Analogie zur Regelungstechnik wird die Regelabweichung von dem Assistenzsystem ausgeregelt, der Fahrer hingegen ist für die Generierung der Sollwertvorgabe zuständig (vgl. auch Kapitel 3.1.2). Bei der für die Konzeptdarstellung verwendeten Aufteilung der Fahrzeugführungsaufgaben in Stabilisierung, Bahnführung und Navigation orientiert sich Winner & Heuss (2005) an dem Drei-Ebenen-Modell von Donges (1982). Die konventionelle Fahrzeugführung nach Donges (1982) ist in Kapitel 2.1 (Abb. 3) bereits dargestellt worden. In Abb. 5 ist die Veränderung der Interaktion Fahrer–Fahrzeug–Umfeld nach dem Drei-Ebenen Modell nach Donges (1982) bei der Nutzung von *Conduct-by-Wire* dargestellt. Die Stabilisierungsaufgabe wird vollständig vom Fahrzeug übernommen. Der Fahrer kommuniziert mit dem Fahrzeug über eine sogenannte Manöverschnittstelle über die Bahnführungskommandos (im Folgenden wird der Begriff *Fahrmanöver* oder kurz *Manöver* synonym für *Bahnführungskommando* verwendet) übergeben werden können. Die vom Fahrer beauftragten Manöver werden von *Conduct-by-Wire* selbstregelnd innerhalb der von der Fahrphysik oder der Umgebung bestimmten Grenzen ausgeführt (Winner *et al.*, 2006).

In dieser Darstellung ist der Wechsel zwischen kontinuierlicher Fahrzeugführung auf *Stabilisierungsebene* und diskreter Fahrzeugführung auf *Bahnführungsebene* nicht dargestellt, ist jedoch im Konzept vorgesehen. Eine weitere Leitidee, nach der *Conduct-by-Wire* entwickelt wird, ist das Paradigma der seriellen Assistenz (Winner *et al.*, 2006). Bei der parallelen Assistenz wirkt der Fahrer direkt auf das Fahrzeug. Das Assistenzsystem liegt parallel zu diesem Wirkungspfad und übernimmt entweder abwechselnd mit dem Fahrer die Fahraufgabe oder unterstützt ihn simultan (Hakuli *et al.*, 2009b). Die serielle Assistenz lässt den Fahrer nur durch das Assistenzsystem auf das Fahrzeug wirken (Hakuli

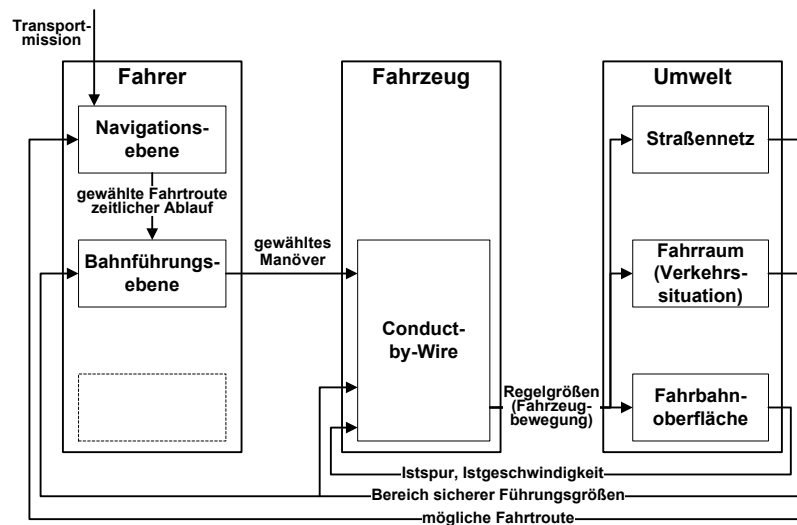


Abbildung 5: Darstellung der konventionellen Fahrzeugführung, des Fahrens mit Fahrerassistenzsystemen, der Fahrzeugführung nach dem *Conduct-by-Wire*-Prinzip und dem Autonomen Fahren nach Winner & Heuss (2005), aufbauend auf dem Drei-Ebenen-Modell von Donges (1982)

et al., 2009b). Auf *Stabilisierungsebene* liegt nach Winner et al. (2006) schon heute eine serielle Assistenz vor, beispielsweise bei der Verwendung des elektronischen Stabilitätsprogramms.

Als wesentliche Vorteile von *Conduct-by-Wire* werden von Winner et al. (2006) unter anderem einer Reduzierung der Bedienkomplexität herkömmlicher Fahrerassistenzfunktionen und die Möglichkeit einer skalierbaren Unterstützung für den Fahrer angeführt. Darüber hinaus kann ein Höchstmaß an Automatisierung realisiert werden, ohne die Verantwortung vom Fahrer zu nehmen, und somit weiterhin kompatibel zur *Wiener Konvention* zu bleiben.

Weitere Ansätze Ein weiterer Ansatz zu kooperativen Fahrerassistenzsystemen wird von Biester (2004, 2008) vorgestellt. In natürlichsprachlicher Dialogform werden zwischen dem Fahrer und dem Fahrzeug Informationen ausgetauscht. Der Fahrer fragt beispielsweise nach einer ausreichend großen Lücke zum Überholen auf einer Landstraße. Das Fahrerassistenzsystem antwortet, dass nach drei Fahrzeugen (aus entgegengesetzter Richtung) eine Lücke zum Überholen vorliegen wird (Biester, 2008). Diese kooperative Assistenz ist in den zwei Situationen „Überholen auf Landstraßen“ und „Linksabbiegen mit Gegenverkehr“ im Vergleich zum manuellen Fahren einer Teilautomatisierung und einer Vollautomatisierung untersucht worden. Biester (2008) konnte zeigen, dass die kooperative Automation in diesen Situationen signifikant weniger Fahrfehler und weniger Spiegelblicke hervorruft. Dieser Ansatz der Kooperation unterscheidet sich von den Ansätzen *H-Mode* und *Conduct-by-Wire*, da hier eher ein Entscheidungsunterstützer vorliegt. Es ist fraglich, wie Fahrerassistenzfunktionen (z. B. von einem ACC) in dieses Konzept integriert werden, speziell, wenn Situationen in die Betrachtung eingeschlossen werden, in denen das Assistenzsystem eine Fehleinschätzung trifft und einen Vorschlag unterbreitet, der bei Befolgung zu einer kritischen Situation führen wird.

2.2.3 Teilautonome Fahrzeugführungskonzepte

In diesem Kapitel werden teilautonome Fahrzeugführungskonzepte vorgestellt, die durch eine komplette Übernahme der Fahraufgabe auf definierten Teilstücken der Fahrmission (z. B. ein spezieller Fahrstreifen auf der Autobahn) gekennzeichnet sind. Im Unterschied zu den autonomen Systemen gibt es bei Teilautomation aber Elemente einer Fahrmission, die weiterhin vom Fahrer, unter Umständen durch ein Fahrerassistenzsystem unterstützt, absolviert werden.

Es werden die Konzepte *eLane*, *Konvoi-Assistenzsystem* und der *Stauassistent* vorgestellt, wobei der Stauassistent durch eine in der ersten Entwicklungsstufe noch notwendigen ständigen Interaktion auch den Fahrerassistenzsystemen zugeordnet werden könnte (Schaller *et al.*, 2008).

eLane In einem Teil des EU-Projektes CityMobil wurden sogenannte *eLanes* untersucht (Schieben & Flemisch, 2008). Dabei handelt es sich um einen speziell ausgezeichneten Fahrstreifen, der über bestimmte technische Randbedingungen verfügt und somit Fahrzeugen (die ebenfalls mit zusätzlicher Technik ausgestattet sind), die diesen Fahrstreifen befahren, Informationen bereitstellt, damit dort hochautomatisiert gefahren werden kann. Dies kann von einer klaren und eindeutigen Fahrstreifenmarkierung bis zu elektronischen Führungselementen in der Fahrbahn oder am Fahrbahnrand reichen. Die *eLanes* verlaufen dabei neben den herkömmlichen Fahrstreifen und sind nicht zwingend für autonome Fahrzeuge reserviert. Verfügt ein Fahrzeug über die technischen Voraussetzungen eine *eLane* zu nutzen, kann das System aktiviert werden, sobald das Egofahrzeug die *eLane* befährt.

Ein kritischer Aspekt, aus Sicht der Fahrzeugergonomie, sind die Wechsel zwischen dem hochautomatisierten Modus und manueller Fahrt. Schieben & Flemisch (2008) konnten beispielsweise zeigen, dass Versuchspersonen in einer Fahrsimulatorstudie zum *eLane*-Konzept durchschnittlich 2,89 s benötigten, um einen Systemausfall zu registrieren und die manuelle Kontrolle zurückzuerlangen.

Platooning- und Konvoiassistenzsysteme Ein weiterer Ansatz zu einer teilautonomen Fahrzeugführung sind Konvoiassistenzsysteme. Im Rahmen des Konvoi-Projekts wurden von Instituten der RWTH Aachen, der *MAN Nutzfahrzeuge AG* und der *Wabco Development GmbH* mehrere Versuchsträger aufgebaut, um die Auswirkungen von elektronisch gekoppelten Nutzfahrzeugen im realen Verkehr zu untersuchen (Deuschle *et al.*, 2010). Ziele dieses Projektes sind die Entlastung des Fahrers, eine Erhöhung der Verkehrssicherheit, den Platz auf den Straßen besser auszunutzen sowie Kraftstoff zu sparen. Besonders die letzten beiden Ziele werden durch eine Verkürzung des Abstandes zwischen den Lkws erreicht, der bei diesem System bei 10 m liegt. Wie auch im *eLane*-Konzept fungiert der Fahrer als Überwacher und kann zu jeder Zeit die Automation ausschalten und in den manuellen Modus zurückkehren.

Im öffentlichen Straßenverkehr sind ca. 3 300 Testkilometer im eingekoppelten Zustand absolviert worden. Es konnte nachgewiesen werden, dass Überholvorgänge von anderen Verkehrsteilnehmern schneller erfolgten, was zu einer besseren Ausnutzung des Straßenraumes geführt hat.

Stauassistent Eine mögliche nächste Entwicklungsstufe für Fahrerassistenzsysteme bzw. der Integration von Fahrerassistenzsystemen ist der Stauassistent. Einige Veröffentlichungen bezeichnen die ACC- Systeme, die im Geschwindigkeitsbereich zwischen $0\text{--}30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ einsetzbar sind als Stauassistenten (Brookhuis *et al.*, 2008), was unter dem Fahrerassistenzsystem ACC Stop & Go bekannt ist. Im Projekt *Invent* (Invent, 2001) ist in den Jahren zwischen 2001 und 2005 ein Stauassistent erforscht worden. Für die Fahrzeugführung sollen bei diesem Stauassistenten die Längs- und die Querregelung miteinander kombiniert werden. Dabei wird auf bestehende Lösungen, wie etwa ACC-Funktionen oder bekannte Algorithmen für die Querregelung, zurückgegriffen und es erfolgt eine Anpassung an den niedrigeren Geschwindigkeitsbereich. Ausführliche Untersuchungen zur Kundenakzeptanz sowie zur Beherrschbarkeit von Stauassistenten führt Schaller *et al.* (2008) durch, der ebenfalls aufbauend auf einem ACC Stop & Go weitere Querführungsfunktionen hinzufügt. Um dem Fahrer nicht die Möglichkeit zu geben, das System als autonomes Stadtsystem zu nutzen, wurde eine Maximalgeschwindigkeit von $40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ festgelegt. Die Evaluation fand in einem dynamischen Fahrsimulator statt und zeigte eine hohe Akzeptanz des Systems. 81 % der Versuchspersonen gaben an, lieber das System mit Querführungsassistenz zu nutzen als ein herkömmliches ACC Stop & Go. Auch konnte gezeigt werden, dass die Fahrer ca. 80 % der Zeit die Hände vom Lenkrad nehmen, was für ein hohes Systemvertrauen spricht. Mit der Situation „kritischer Einscherer“ wurde die Beherrschbarkeit des Systems untersucht. Zwischen dem ACC Stop & Go und dem Stauassistenten wurde kein signifikanter Unterschied bei der Reaktionszeit festgestellt. Beide liegen mit einer Reaktionszeit von ca. 1 s in einem tolerablen Bereich.

2.3 Automatisierung und Manöverführung in anderen Bereichen der Technik

In diesem Kapitel werden manöverbasierte Führungskonzepte aus anderen Bereichen der Technik vorgestellt.

Robotik Im Forschungsgebiet der Robotik wird an mehreren Stellen an Manöverführungen gearbeitet. Ein Konzept zu einer manöverbasierten Führung eines Rollstuhls stellen Ouiguini *et al.* (2000) vor, die beispielhaft die technischen Randbedingungen für ein Parkmanöver zeigen. Der Prototyp ist nicht in Probandenversuchen evaluiert worden.

Einen allgemeinen Ansatz zu einer automatischen Fahrmanöverplanung von Robotern stellt Bott (1996) vor. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf der lokalen Ausführung und technischen Implementierung von Fahrmanövern in engeräumigen Umgebungen für frei navigierende mobile Roboter. Es werden die Manöver „Wenden“, „Andocken“ und „Einparken“ erstellt und untersucht. Es wird keine Mensch-Maschine-Interaktion abgebildet. Ein weiteres Beispiel der Manöverführung ist in der Bewegung von Robotern in der Raumfahrt zu finden. Speziell ferngesteuerte motorisierte Landfahrzeuge (Rover), die auf fremden Himmelskörpern zu Forschungszwecken eingesetzt werden, können aufgrund der Latenz der Signalübertragung, durch große Distanzen zwischen Kontrollzentrum und Rover, nicht kontinuierlich gesteuert werden. Beim Mars-Rover *Rocky 7* wird anhand eines Bildes der Umgebung, das der Rover an das Kontrollzentrum sendet, eine Trajektorie eingezeichnet, die der Rover im Anschluss nachfährt (Volpe *et al.*, 1996).

Dies ähnelt dem *Conduct-by-Wire*-Konzept insoweit, dass in beiden Fällen Sollgrößen vom Operateur vorgegeben und von einem Assistenzsystem ausgeführt werden. Im Fall des Mars-Rovers ist die Bahnplanung hochdetailliert, lässt somit aber auch wenig Raum, um standardisierte Manöver abzuleiten. Überträgt man die Idee der Einzeichnung einer

Bahnführung in die Umgebung auf die Fahrzeugführung, könnte man sich ein Touchscreen vorstellen, das das Egofahrzeug und dessen Umfeld in der Vogelperspektive abbildet. Der Fahrer könnte in dieses Bild die Trajektorie (z. B. mit dem Finger) einzeichnen und vom Fahrzeug ausführen lassen.

Es bleiben aber Unsicherheiten im Straßenverkehr, denen ein Mars-Rover nicht begegnen muss. So ist die Geschwindigkeit und damit der zeitliche Entscheidungshorizont im öffentlichen Straßenverkehr begrenzt. Dies gilt auch für den Fall, dass der Operateur mehr Zeit für eine Bahnplanung benötigt. Der Mars Rover kann in der Regel einfach anhalten und stehen bleiben, was im Fahrzeug nicht möglich ist. Darüber hinaus ist es für einen Rover nicht notwendig, andere Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen.

Flugführung In vielen Fällen wird der Fortschritt in der Fahrerassistenzsystementwicklung mit der Entwicklung des Autopiloten verglichen (Stanton & Marsden, 1996). Dieser Aussage muss jedoch entgegengesetzt werden, dass sich die Flugführung in für die Automation entscheidenden Elementen von der Fahrzeugführung unterscheidet.

Der Zeithorizont einer Entscheidung und besonders einer Rückübernahme von einem hoch- in einen niedrig- oder nicht automatisierten Betrieb ist in der Regel mit einer weitaus größeren Zeitspanne zwischen der Warnung an den Operateur und der potentiellen Kollision verbunden. Entscheidet ein LKAS auf gerader Strecke, einen Lenkwinkel zu beaufschlagen, kann die Zeit, die dem Fahrer für eine Reaktion zur Verfügung steht, im Bereich von Sekundenbruchteilen liegen. Bei Flugzeugen ist der Zeithorizont in der Regel wesentlich größer. Bei der Flugzeugkollision von Überlingen am Bodensee standen zwischen der ersten Kollisionswarnung und der Kollision selbst 50 s zur Verfügung (Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung, 2002). Das Notbremssystem des Mercedes *Pre-Crash-Systems* warnt den Fahrer ca. 2,6s vor der Kollision (Breuer, 2009). In anderen Situationen wie etwa dem Starten oder dem Landen sind kürzere Zeiträume für das Treffen von Entscheidungen möglich, in diesen Situationen ist der Pilot allerdings unter normalen Umständen hoch konzentriert.

Darüber hinaus lassen sich die Fahrzeug- und Flugführung aufgrund des Trainingsstandes des Operators nicht miteinander vergleichen. Piloten sind hochtrainiert und müssen in regelmäßigen Abständen zu Untersuchungen und Tests. Die Anforderungen an das Autofahren erfüllt ein Großteil der Bevölkerung. Außerdem gibt es keine regelmäßige Überprüfung der Fahrtauglichkeit. Piloten werden auf die verschiedenen Systeme im Flugzeug geschult. Wird ein Fahrzeug mit Fahrerassistenzsystem gekauft, ist meist die einzige Hilfestellung die Betriebsanleitung. Auch deshalb müssen Systeme für den öffentlichen Straßenverkehr anders ausgelegt werden.

2.4 Chancen und Risiken der Automation von primären Fahraufgaben

Die Automatisierung von Aufgaben, die für die Absolvierung einer Fahrmission nötig sind, hat seit der Erfindung des Automobils das Autofahren stetig vereinfacht. Sind bis in die 1970er Jahre hauptsächlich Systeme entwickelt und in den Fahrzeugen implementiert worden, die den Fahrer von physischer Arbeit entlasten, wie der Anlasser zum Starten des Motors oder die Servolenkung, wird der Fahrer heute auch auf informatorischer Seite unterstützt. Neben den Hinweis- (Navigationssysteme) und Warnsystemen (Lane Departure Warning) werden seit Mitte der 90er Jahre auch Systeme angeboten, die umfangreiche Teile der primären Fahraufgabe automatisieren. Dazu gehören im Wesentlichen das ACC für die Längsführung auf Autobahnen oder die Fahrstreifenhaltung durch das LKAS. Über

die Chance und Risiken solcher Systeme sind vor allem aufgrund der Einführung von ACC Studien im Bereich der Fahrzeuergonomie durchgeführt worden. Dieses Kapitel soll die Chancen und Risiken der Automatisierung von primären Fahraufgaben aufzeigen, die für die spätere Konzeptionierung und Evaluation der manöverbasierten Fahrzeugführung berücksichtigt werden sollen.

Nach Wickens *et al.* (2004) gibt es allgemein auf technische Systeme bezogen vier Gründe für Automatisierung:

1. Die Ausführung einer Aufgabe durch den Operateur ist gefährlich oder gar nicht möglich.
2. Die Ausführung einer Aufgabe ist für den Operateur schwierig oder unangenehm.
3. Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wird durch die Automation verbessert.
4. Die Automatisierung einer Aufgabe ist technisch möglich und kosteneffizient anwendbar.

Für die Entwicklung einer manöverbasierten Fahrzeugführung ist der 1. Punkt kritisch zu betrachten, da der Fahrer auch bei automatisierten Systemen im Fahrzeug verbleibt und somit auch keine Reduktion des Risikos vorliegt, wie es bei der Automatisierung von Lackierstraßen für Fahrzeugkarosserieteilen der Fall ist. Eine Reduktion der Gefährlichkeit könnte aber vorliegen, wenn die Ausführungen durch das Assistenzsystem oder die Kooperation von Assistenzsystem und Operateur weniger Fehler verursachen als der Mensch selbst. In Abhängigkeit der richtigen Aufgabenteilung und der Güte der Funktionen eines manöverbasierten Fahrzeugs kann ein Sicherheitsgewinn erzielt werden.

Es gibt nach Matthews *et al.* (1996) Anteile der Bevölkerung, die eine Abneigung gegenüber dem Autofahren besitzen. Diesen Nutzern könnte man das Führen eines Kraftfahrzeugs erleichtern, wenn Teile der Fahrzeugführungsaufgabe automatisiert wären. Der zweite Grund nach Wickens *et al.* (2004) trifft auf die Entwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung demnach zu.

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems kann durch Fahrerassistenzsysteme ebenfalls erhöht werden, wenn beispielsweise weniger Zeit für eine Fahrmission benötigt wird. Eine Kostenersparnis könnte durch eine Reduktion von Verkehrsunfällen oder Kraftstoffeinsparungen erzielt werden. Steht ein zumindest für Streckenabschnitte fehlerfreies System zur Verfügung, könnte die Zeit des Autofahrens mit Nebenaufgaben (z. B. Lesen von E-Mails) genutzt werden.

Stanton & Marsden (1996) identifizieren drei Hauptgründe für die Einführung von Automation im Kraftfahrzeug.

1. Das Führen eines Fahrzeugs ist eine beanspruchende Tätigkeit. Eine Automatisierung von Fahraufgaben kann somit das Wohlbefinden des Fahrers steigern.
2. Die meisten Verkehrsunfälle sind auf Fehler des Fahrers zurückzuführen. Wenn die Automation Situationen besser beherrschen kann als der Fahrer, ist ein Sicherheitsgewinn zu erzielen.
3. Vom ökonomischen Standpunkt aus kann Automation das Kaufinteresse wecken sowie die Attraktivität von Produkten steigern.

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die ersten beiden Punkte nach Stanton & Marsden (1996) gelegt. In Kapitel 2.4.1 werden bisherige Erkenntnisse zur Veränderung der Beanspruchungssituation durch teilautomatisierte Fahrzeugführungssysteme und -konzepte aufgezeigt sowie die Methoden zur Bestimmung der Beanspruchung vorgestellt.

Die Veränderung der Sicherheit durch teilautonome Systeme wird durch viele Aspekte bestimmt und wird in dieser Arbeit von der Risikoseite beurteilt. Die Bestimmung der Attraktivität und Nutzerfreude bezüglich Fahrzeugautomation wird in weiteren Forschungsarbeiten des *Instituts für Arbeitswissenschaft* der TU Darmstadt erforscht (Kauer *et al.*, 2010a) und wird hier nicht weiter betrachtet.

Neben den Chancen, die automatisierte Systeme bieten, gibt es auch Risiken, die in die Entwicklung und Evaluation von Systemen, die Teile der primären Fahraufgabe übernehmen, miteinbezogen werden müssen. Nach Wickens *et al.* (2004) ist vor allem das Überschätzen der Leistungsfähigkeit der Automation und der damit verbundene Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe ein wesentliches Problem. Der Fahrer besitzt keine ausreichende *Situation Awareness* (Endsley, 1995) und kann auf unvorhergesehene Situationen kaum reagieren. Diese Problem wird in Kapitel 2.4.2 näher erläutert.

Ein Sicherheitsrisiko besteht nach Schieben & Flemisch (2008) beim Wechsel zwischen Automationsstufen. Diese *Transitionen* und deren Probleme hinsichtlich der Fahrzeugführung werden in Kapitel 2.4.3 erläutert.

Neben dem Rückzug aus der Fahraufgabe kann sich die Fahrerverhaltensänderung, ausgelöst durch eine Automation von Fahraufgaben, negativ auf die Sicherheit auswirken. Nach Buld *et al.* (2005) existiert ein sogenannter *Mitzieheffekt* (vgl. Kapitel 2.4.4), der Nutzer dazu veranlasst, mit einer Automation größere Risiken einzugehen als bei manueller Fahrt.

Ein automatisiertes System muss für den Fahrer immer bedienbar und verständlich bleiben, was in der Regel mit einer moderaten Komplexität des Systems, einer einfachen Bedienung (Gebrauchstauglichkeit) und einer verständlichen Rückmeldung des Systems an den Nutzer einhergeht. Die leichte Bedienbarkeit, die Rückmeldung des Systems eingeschlossen, wird über die Gebrauchstauglichkeit erfasst.

Ein zentrales Problem der Automatisierung ist ein mögliches fehlendes Verständnis der Automation und ihrer Handlungen. Sarter & Woods (1995) führen daher den Begriff der *Mode Awareness* ein, der eine Einschätzung über das System- oder Automationsverständnis des Nutzers geben soll. Dieser Aspekt wurde von Sarter & Woods (1995) vor allem für Flugführungssysteme untersucht, lässt sich aber analog auf die Fahrzeugführung anwenden und wird in Kapitel 2.4.5 erläutert.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Automatisierung von primären Fahraufgaben beachtet werden muss, ist der Verlust an Fertigkeiten, ein Fahrzeug manuell zu steuern (Endsley, 1995; Wickens *et al.*, 2004). Dieses Problem ist in der Luftfahrt bekannt. Piloten werden daher in gewissen Intervallen im Simulator geschult. Dabei werden speziell Situationen hervorgerufen, die im Betrieb eines Flugzeuges nur selten vorkommen (Wickens & Hollands, 2000, S. 283).

2.4.1 Reduzierung der Beanspruchung des Fahrers durch Fahrerassistenzsysteme

Ein Ziel von Fahrerassistenzsystemen und teilautonomen Fahrzeugführungskonzepten, die primäre Fahraufgaben übernehmen, ist die Entlastung des Fahrers (Stanton & Young, 1998). Besonders bei der Entwicklung und während der Einführung von ACC sind Studien durchgeführt worden, die auf die Beanspruchung des Fahrers fokussierten.

Nilsson (1995) zeigte in einer Fahrsimulatorstudie, dass kein signifikanter Unterschied der mentalen und physischen Beanspruchung bei der Nutzung von ACC im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung vorliegt. Untersucht wurden verschiedene kritische Situationen mit insgesamt 20 Versuchspersonen. Für die Beanspruchungserfassung wurde der *NASA Task-Load-Index* (NASA-TLX) nach Hart & Staveland (1988) verwendet. Die anderen Skalen des NASA-TLX („Zeitliche Anforderung“, „Aufgabenerfüllung“, „Anstrengung“ und „Frustration“) waren ebenfalls nicht signifikant.

Stanton *et al.* (1997) untersuchen das Rücknahmeverhalten beim Wechsel vom Fahren mit ACC zur konventionellen Fahrzeugführung im Fahrsimulator mit zwölf Versuchspersonen mit Hilfe einer Zweitaufgabe. Während der Fahrt mit ACC war die Ausführung der Zweitaufgabe bei aktivem ACC signifikant höher, was auf einen niedrigeren Workload schließen lässt. Es wird kein Vergleich über die Erfüllung der primären Fahraufgabe aufgeführt (z. B. Fahrstreifenhalteteile), was die Methodik der Zweitaufgabe, neben der kleinen Stichprobe, hier in Frage stellt. Der Widerspruch, der sich zur Studie von Nilsson (1995) zeigt, könnte auf eine Ressourcenverlagerung von der primären Fahraufgabe (hier Querverführung) zur Zweitaufgabe zurückzuführen sein (Stanton *et al.*, 1997).

Young & Stanton (1997) untersuchten die Beanspruchung von Fahrzeugführern im Fahrsimulator bei der Nutzung von ACC und/oder LKAS. Jeder der 30 Probanden fuhr einmal konventionell, mit ACC, mit LKAS und mit ACC + LKAS. Die Beanspruchung wurde über den NASA-TLX nach Hart & Staveland (1988) und eine Zweitaufgabe erfasst. Sowohl die Gesamtbewertung aus dem NASA-TLX als auch die Zweitaufgabe zeigten hoch signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Automationssystemen, außer zwischen der manuellen Fahrt und der ACC-Fahrt. Die Beanspruchung war am niedrigsten bei der Kombination von ACC und LKAS, gefolgt von der Fahrt mit LKAS. Die konventionelle Fahrt und die Fahrt mit ACC wiesen die höchste Beanspruchung auf. Im Fall der ACC-Fahrt scheint es somit nur zu einer Verschiebung der Beanspruchung von der Ausführungstätigkeit zu einer Überwachungstätigkeit zu kommen.

Eine Studie von Young & Stanton (2007), in der die gleichen Fahrerassistenzsysteme verwendet wurden, aber die Versuchspersonen in die Gruppen „Novizen“ (keine Fahrerfahrung), „Fahrschüler“ (in Ausbildung, aber noch keinen gültigen Führerschein), „Experten“ (Dauer des Führerscheinbesitzes > 1 Jahr) und „fortgeschrittene Fahrer“ (zusätzlich zur Fahrerlaubnis ist die Versuchsperson Mitglied im *Institute of Advanced Motorists* von Großbritannien) unterteilt sind, stützt dieses Ergebnis. Auch hier ist (mit Ausnahme der Novizen) nur bei einer kombinierten Längs- und Querverführungsunterstützung eine Beanspruchungsreduktion nachzuweisen.

Im Gegensatz zu den Fahrsimulatorversuchen konnte Stanton & Young (2005) in Feldversuchen zeigen, dass bei der Nutzung eines ACC eine Reduzierung der gesamten Beanspruchung und der mentalen Anforderungen nach dem NASA-TLX erzielt werden kann. Buld *et al.* (2005) führte ebenfalls eine Studie mit verschiedenen Assistenzsystemen durch (Konventionell, ACC, ACC+LKAS, LDW) und lies diese subjektiv hinsichtlich der Beanspruchung für ACC, ACC+LKAS und LDW von 1 bis 5 auf einer Likertskala bewerten. Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Tendenziell ist die Beanspruchung bei warnender Assistenz (LDW) etwas höher.

Die unterschiedlichen Ergebnisse, die hier in Feld- und Fahrsimulatorversuchen erzielt wurden, könnten in der Anzahl an kritischen Situationen, denen der Fahrer während der Versuche ausgesetzt war, begründet sein. Der Fahrsimulator bietet generell den Vorteil gegenüber Feldversuchen, dass kein Sicherheitsrisiko für die Versuchspersonen besteht (Blana, 1996). Somit ist es möglich, auch gezielt kritische Situationen hervorzurufen,

was für die Studien von Nilsson (1995) und Stanton *et al.* (1997) der Fall ist. Es ist nicht auszuschließen, dass sich kritische Situationen, auch wenn es wenige sind, entscheidend auf die Beanspruchung auswirken.

2.4.2 Beeinträchtigung der Situation Awareness durch Automation

Automation bedeutet die Übernahme von Tätigkeiten des Menschen durch technische Systeme. Wird die Aufgabe vollständig und zuverlässig übernommen, ergeben sich lediglich technische Herausforderungen. Machen aber Systemausfälle menschliche Eingriffe nötig und/oder werden nur Teile der Tätigkeit durch das System übernommen, stellt sich das Problem der Aufgabenteilung und damit der Interaktion zwischen Aufgabe, Mensch und technischem System.

Die Automationszuverlässigkeit wird für ein manöverbasiertes Fahrzeugführungskonzept in der nächsten Dekade nicht vollständig gewährleistet sein, so dass der Fahrer bei aktivierter Automation stets eine Überwachungstätigkeit ausführen muss. Werden dem Nutzer, wie in diesem Fall dem Fahrer, Aufgaben entzogen, kann das Problem der Unterforderung, einhergehend mit einer Vigilanzreduzierung, auftreten (Bainbridge, 1983; Parasuraman *et al.*, 1993). Daraus folgt oft, dass der Operateur seine Überwachungsaufgabe nicht mehr ausreichend wahrnehmen kann. „Mit Vigilanz wird die Fähigkeit eines Menschen bezeichnet, über längere Zeit hinweg die Aufmerksamkeit auf eine Aufgabe zu richten, z. B. bestimmte Signale zu entdecken“ (Kluwe, 2006, S. 48).

Schmidtke (1966) konnte zeigen, dass die Leistungsfähigkeit des Menschen in Abhängigkeit der Aufgaben pro Zeiteinheit nicht, wie man vermuten könnte, regressiv, sondern in Form einer inversen U-Kurve verläuft. In Versuchen im Bereich des Radar-Beobachtungsdienstes lag das Maximum der Beobachtungsgüte, was mit der Leistungsfähigkeit gleichgesetzt werden kann, bei ca. 100 Signalen je 30 min (Schmidtke, 1966). Nach Mackworth (1961) ist mit einem deutlichen Vigilanzabfall nach etwa 30 min, in denen sehr wenig passiert, zu rechnen.

Die Vigilanzreduktion eines Nutzers durch eine Unterbeanspruchung ist ein Aspekt der mit der Theorie der *Situation Awareness* erfasst werden kann (Endsley, 1995). Die *Situation Awareness* beschreibt dabei „the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future“ (Endsley, 1995, S. 34). Eine ausreichende *Situation Awareness* setzt demnach voraus, dass der Nutzer relevante Informationen wahrnimmt (*Situation Awareness Level 1*), er diese Information versteht (*Situation Awareness Level 2*) und er eine Antizipation der zukünftigen Situationsentwicklung (*Situation Awareness Level 3*) vollziehen kann.

Bezieht man dies auf die Fahraufgabe, liegt eine verminderte *Situation Awareness Level 1* vor, wenn relevante Informationen der Fahrumgebung nicht wahrgenommen werden. Da das Führen eines Fahrzeugs überwiegend über den visuellen Sinneskanal abläuft (Rockwell, 1972; Sivak, 1996) sind hier Beeinträchtigungen der Fixationshäufigkeiten und Fixationsdauern zu fahrzeugführungsrelevanten Informationen zu erwarten (z. B. zum Rückspiegel oder auf Verkehrsschilder). Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn der Fahrer ein vorausfahrendes Fahrzeug bei aktiviertem ACC nicht mehr in seine Blickmuster miteinbezieht. Eine Beeinträchtigung auf Level 2 liegt im Straßenverkehr dann vor, wenn Informationen zwar wahrgenommen, aber nicht verstanden werden. Wird beispielsweise eine leicht glänzende Fahrbahn, hervorgerufen durch eine Eisschicht, wahrgenommen, aber nicht als Gefahr verstanden, wird diese falsche Situationseinschätzung auf Level 2 zu

einer zu hohen Geschwindigkeit führen und das Risiko eines Unfalls erhöhen. Einbußen auf Level 2 liegen oft auch bei ergonomisch ungünstig gestalteten Mensch-Maschine-Schnittstellen vor, wenn Hinweise von Assistenzsystemen wahrgenommen, aber nicht verstanden werden (beispielsweise eine ACC-Anzeige zur Erkennung eines Zielfahrzeugs wurde nicht verstanden). Defizite auf Level 3 liegen vor, wenn der Fahrer eine Information wahrgenommen und verstanden hat, den zukünftigen Verlauf unter den gegebenen Bedingungen aber falsch einschätzt. Dies liegt beispielsweise vor, wenn ein Fahrer in Kolonnenfahrt bei aktivem ACC in eine Kurve mit kleinem Radius fährt und dabei nicht bedenkt, dass sich in scharfen Kurven ein Vorauszuhender kurzzeitig aus der Radarkeule des ACC-Systems bewegen kann. Ist dies geschehen und ist die Wunschgeschwindigkeit größer als die Istgeschwindigkeit, kommt es zu einer ungewollten Beschleunigung in der Kurve.

Ward (2000) postuliert über das Modell der leistungsmindernden Effekte, dass Automation (als Beispiel wird das ACC verwendet) zu einer Reduzierung der *Situation Awareness* führt aufgrund einer Verschlechterung des Aufmerksamkeits- und Wachheitsgrades sowie der durch Endsley & Kiris (1995) beschriebenen *Out of the Loop*-Problematik. Da das Führen eines Fahrzeugs für die meisten Nutzer eine hochgeübte Aufgabe ist, die verhältnismäßig wenig kognitive Anteile enthält, liegen Einbußen der *Situation Awareness* bei der Nutzung von Assistenzsystemen oder teilautonomen Fahrzeugführungskonzepten meistens auf Level 1 vor. Diese meist visuellen Ablenkungen liegen in der Erfüllung von Nebenaufgaben begründet (Rauch, 2008).

Buld *et al.* (2005) konnte in einer Fahrsimulatoruntersuchung zeigen, dass die Fahrerleistung negativ mit der Qualität der Automation korreliert ist. Als Automation wurde in diesen Versuchen ein ACC verwendet. Die Qualität des ACC und damit der Automation wurde anhand von Systemausfällen variiert. Dies impliziert, dass, wenn dem Fahrer eine Automation, die sehr zuverlässig arbeitet, bereitgestellt wird, Kompensationsstrategien entwickelt werden müssen, um seine *Out of the Loop*-Performance zu verbessern.

Automatische Automationsstufenwechsel sind ein wesentliches Bedenken bei der Einführung von Automation im Flugzeugcockpit, da die Aufmerksamkeit bei Piloten oft nicht ausreicht, die Automationswechsel zu erkennen, oder sie diese nicht verstehen (Federal Aviation Administration, 1996). Die Verringerung der Vigilanz ist hier die Ursache, so dass Nutzer, die durch weitreichende Automation unterstützt werden (z. B. Piloten), oft bei der Führungsaufgabe von 99 % Langeweile und 1 % Panik sprechen (Kraiss, 1994).

Im Projekt *H-Mode* nach Flemisch *et al.* (2003) (vgl. Kapitel 2.2.2) hat man das Problem erkannt und versucht über eine haptisch-multimodale Kopplung zwischen Fahrer und Automation den Fahrer im Regelkreis zu halten, obwohl eine sehr verlässliche Assistenz angenommen wird (Flemisch *et al.*, 2010; Heesen *et al.*, 2010). Da der Fahrer durch die Bewegungen oder Kraft am Bedienelement zu jeder Zeit weiß, welche Aktionen die Automation gerade durchführt, konnte in einer Exploration gezeigt werden, dass bei der Rückübernahme vom überwiegend teilautomatischen („Loose Rein“) zum überwiegend manuellen Modus („Tight Rein“) weniger Fahrstreifenmarkierungsüberquerungen und Verlassen der Fahrbahn vorlagen. Eine statistische Absicherung fand aufgrund der zu geringen Versuchspersonenzahl nicht statt.

Ein weiterer Ansatz von Horwick & Siedersberger (2010) möchte den Fahrer durch einen „Totmannschalter“ im Regelkreis behalten. Es ist allerdings fraglich, ob der Fahrer entlastet werden kann, wenn er in Zeitabständen von wenigen Sekunden einen Knopf betätigen muss.

In einer Untersuchung von Ma & Kaber (2005) in einem Fahrsimulator mit 18 Versuchspersonen konnte gezeigt werden, dass eine Nutzung von ACC sogar eine Steigerung der *Situation Awareness* herbeiführen kann. Die Versuchspersonen fuhren in vier Versuchsterminen auf autobahnähnlichen Straßen. Die Simulation wurde an definierten Stellen „eingefroren“, und die Versuchsperson wurde zur aktuellen Situation befragt (SAGAT-Methode nach Endsley, 1988). Hier scheint die Automation durch das ACC dazu geführt zu haben, dass mehr Informationen aufgenommen werden können. Neben der ACC-Nutzung wurde ebenfalls der Einfluss von Mobiltelefonen untersucht.

2.4.3 Sicherheitskritisches Stabilisierungsverhalten bei einem Wechsel von Automationsstufen

Während sich Kapitel 2.4.2 mit dem Verlust der *Situation Awareness* beschäftigt, also die Einbußen bei der Wahrnehmung der situationsrelevanten Informationen beschreibt, und somit die Entscheidungsfindung für einen vom Fahrer initiierten Automationsstufenwechsel beeinträchtigt, gibt es bei der Rückübernahme der manuellen Kontrolle ein *Out of the Loop*-Problem auf *Stabilisierungsebene*. Hat der Fahrer längere Zeit nicht auf *Stabilisierungsebene* agiert, ist es für ihn beispielsweise schwierig, ein adäquates Moment am Lenkrad zu beaufschlagen (Eckstein, 2009). Bestärkt wird diese These durch Untersuchungen von Weinberger *et al.* (2001), in denen speziell Fahrereingriffe aus dem ACC-Betrieb heraus untersucht wurden. Mehr als ein Drittel aller maximalen Verzögerungen bei einer Rückübernahme waren größer als $3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Dies ist größer als der von Wegscheider & Prokop (2005) angegebene Wert für „normale“ Fahrer. Das 85 %-Perzentil der maximalen Längsverzögerung beträgt dort ca. $2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Auch Bender (2008) empfiehlt, bei der Auslegung eines Notausweichassistenten kurze Lenkimpulse zu verwenden, um das Problem einer Rückübernahme nach einem vollautomatischen Ausweichen durch das Assistenzsystem zu umgehen. Es konnte gezeigt werden, dass die Variante des kurzen Lenkimpulses auch hinsichtlich des Sicherheitsgefühls und der Akzeptanz besser beurteilt wurde als die Varianten, bei denen nach einem automatischen Notausweichen eine Rückübernahme stattfinden musste (Bender, 2008).

2.4.4 Risikohomöostase und Mitzieheffekt

Nach Wilde (1982) ist die individuelle Risikobereitschaft eines Fahrers eine mehr oder weniger konstante persönliche Eigenschaft. Dies impliziert, dass Anstrengungen, den Straßenverkehr, beispielsweise durch Maßnahmen am Fahrweg oder Fahrerassistenzsysteme, sicherer zu gestalten, zum Teil oder gänzlich durch ein geändertes Fahrerverhalten kompensiert werden. Dies kann beispielsweise in einer höheren Geschwindigkeit oder weniger vorsichtigen Fahrweise beobachtet werden. In verschiedenen Studien konnte die von Wilde (1982) aufgestellte Theorie belegt werden. Aschenbrenner & Biehl (1994) zeigen, dass die Einführung des *Anti-Blockier-Systems* (ABS) bei Taxifahrern zu einer durchschnittlich kürzeren Zeitlücke zu vorausfahrenden Fahrzeugen führt. Eine ähnliche Studie, die ebenfalls das Fahrerverhalten von Taxifahrern mit und ohne ABS untersucht, ist bei Sagberg *et al.* (1997) zu finden. Auch hier werden kürzere Zeitlücken bei den Fahrern mit ABS identifiziert. Der Effekt ist allerdings nur bei aktiven Sicherheitssystemen zu finden. Die passive Sicherheitsmaßnahme des Airbags ließ die Zeitlücken unverändert (Sagberg *et al.*, 1997).

Ein mit der Nutzung von Fahrerassistenzsystemen zusammengebrachter Begriff ist der des *Mitzieheffektes* (Buld *et al.*, 2005). Begehen beispielsweise vorausfahrende Fahrzeuge, auf die das Assistenzsystem des Egofahrzeugs reagiert (z. B. die an den Vorausfahrenden angepasste Egofahrzeuggeschwindigkeit bei der Nutzung von ACC) in bestimmten Situationen Fehler, wirken sich diese auch auf das Egofahrzeug aus, wenn der Fahrer nicht eingreift (Buld *et al.*, 2005). In Fahrsimulatorversuchen konnten Buld *et al.* (2005) zeigen, dass sich bei Kolonnenfahrten, in denen das vorausfahrende Fahrzeuge in Kurven und am Ortseingang eine zu große Geschwindigkeit wählt, der Fahrer mitziehen lässt und ebenfalls zu hohe Geschwindigkeiten wählt.

Der *Mitzieheffekt* ist nicht auf das Verhalten von Vorausfahrenden beschränkt. Der Effekt liegt ebenfalls vor, wenn Fahrzeugführer bei der Nutzung von Assistenzsystemen das Fahrzeug im aktiven Modus ohne Veränderung der Parametereinstellungen des Assistenzsystems belassen, obwohl Parameteränderungen wie die Längsgeschwindigkeit einer Anpassung bedürfen. Buld *et al.* (2005) konnte in der gleichen Studie zeigen, dass der laterale Abstand zu einem halb auf der Straße geparkten Fahrzeug bei der Nutzung eines LKAS tendenziell kleiner ist als bei manueller Fahrzeugführung, es konnte jedoch kein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Nilsson (1995) wies einen signifikant höheren Anteil des Verbleibens auf der Überholspur nach, wenn ein ACC genutzt wurde. Die Ursache wird nicht diskutiert. Es können zwei mögliche Gründe in Betracht gezogen werden. Zum einen könnte der Fahrer den Nutzen des ACC-Systems, der in einer Kolonnenfahrt ohne häufige Fahrstreifenwechsel als hoch angenommen werden kann, erhöhen, indem er in einer Fahrzeugkolonne verbleibt. Dies kann zu einer höheren Fahrzeuggeschwindigkeit führen. Zum anderen ist es aber auch möglich, dass der Fahrer „fahrstreifenwechselfaul“ wird, da bei diesem Fahrmanöver oft Anpassungen oder eine Deaktivierung des Systems nötig sind.

Buld *et al.* (2005) führten in Fahrsimulatorversuchen eine Sondersituation – den Auscherer – durch, die diese Art des *Mitzieheffektes* untersucht. Ein Fahrzeug auf dem Gegenfahrstreifen einer Landstraße setzt zum Überholen an und befährt somit einen Teil des Fahrstreifens des Egofahrzeugs. Das richtige Verhalten in dieser Situation ist, die Reduzierung der Geschwindigkeit sowie, dem Fahrzeug so weit wie möglich nach rechts auszuweichen (Buld *et al.*, 2005). Bei manueller Fahrzeugführung nutzten 22 von 24 Versuchspersonen das Schleppmoment des Fahrzeugs, eine Versuchsperson bremste, und ein Fahrer reagierte nicht. In der ACC-Gruppe wurde zu überwiegendem Teil das ACC aktiv belassen. Von 8 Versuchspersonen ließen 7 das ACC aktiv und führten keine Anpassung der Geschwindigkeit durch. Lediglich eine Versuchsperson bremste und wählte somit ein ähnliches Risikoniveau wie ohne ACC.

2.4.5 Mode Awareness und notwendige Rückübernahmen durch den Fahrer

Beim manuellen Führen eines Fahrzeugs steht die Aufrechterhaltung der *Situation Awareness* im Vordergrund. Wenn einfache Fahrerassistenzsysteme verwendet werden, wie der Tempomat, muss der Fahrer nur wenig Systemverständnis aufbringen. Liegen aber Systeme im Fahrzeug vor, die der Fahrer verstehen muss, reicht es nicht aus, die Situation richtig einzuschätzen, er muss ebenfalls den Systemzustand der Fahrerassistenzsysteme verstehen sowie die zukünftigen Handlungen des Systems prädizieren. Stanton & Young (2000) sprechen in diesem Zusammenhang von der Bedeutung mentaler Modelle bei der Verwendung solcher Fahrerassistenzsysteme. Carroll & Olson (1987, S.34) definieren ein mentales Modell als „a mental structure that reflects the user's understanding of a system“.

Mentale Modelle entwickeln sich durch die Interaktion des Operators mit dem System und bilden dabei eine interne Repräsentation der dynamischen und statischen Systemeigenschaften (Schmidt & Luczak, 2006).

Für die Fahrzeugführung mit assistierenden Systemen ist neben einer ausreichenden *Situation Awareness* das Verständnis über die Funktionsweise der technischen Systeme notwendig. Diese beiden Konstrukte, *Situation Awareness* und Systemverständnis (auch mentale Modelle des Systems), bringen Sarter & Woods (1995) mit der Theorie der *Mode Awareness* zusammen. *Mode Awareness* definieren Sarter & Woods (1995, S. 7) dabei als „the ability of a supervisor to track and to anticipate the behavior of automated systems“. Mit zunehmendem Komplexitätsgrad von Fahrerassistenzsystemen bis hin zu teilautonomen Systemen wird diese Aussage immer wichtiger. Dabei stehen für das Systemverständnis die folgenden Fragen im Vordergrund (Sarter & Woods, 1995):

1. Was macht die Automation gerade?
2. Warum macht die Automation dies?
3. Was wird die Automation als nächstes tun?

Die Theorie zur *Mode Awareness* ist in der Automation von Flugführungsaufgaben entwickelt worden. Bis vor wenigen Jahren war eine Übertragung dieser Theorie auf die Fahrzeugführung nicht nötig, da außer dem Tempomaten, der in sehr eingeschränkten Systemgrenzen agiert, keine Assistenz für die primäre Fahraufgabe vorhanden war. Mit der Einführung von ACC konnte das erste Mal beobachtet werden, dass komplexere Fahrerassistenzsysteme mit verschiedenen Systemgrenzen, die dem Fahrer für ein sicheres Führen des Kraftfahrzeugs bewusst sein müssen, nicht immer vollständige *Mode Awareness* beim Fahrer gewährleisten konnten. Besonders die Situation, in der der Fahrer erkennen muss, dass ein vor ihm befindliches Fahrzeug nicht erkannt wird, weil es sich nicht bewegt bzw. während der Erfassung in der Radarkeule des Egofahrzeugs nicht bewegt hat, sind schwierig zu meistern. In der Studie von Nilsson (1995) sind in der Situation „stehendes Stauende“ bei aktiviertem ACC 4 von 20 Versuchspersonen mit dem Stauende kollidiert. Diese Situation ist in den Versuchen von Nilsson (1995) in der Einführung nur erklärt, aber nicht demonstriert worden.

Ausgehend von den beiden Fragen, ob ein Assistenzsystem eine Situation bewältigt und ob es annimmt, dass es die Situation bewältigt, können vier Kategorien der Kritikalität von Situationen abgeleitet werden, die in Tab. 2 dargestellt sind. Der Idealfall liegt vor, wenn das System davon ausgeht, dass es eine Situation bewältigt, und wenn es diese Situation auch tatsächlich bewältigt. Der Fahrer wird in den meisten Fällen das System aktiviert lassen, und es besteht kein Sicherheitsrisiko.

Ein ebenfalls unkritischer (vorausgesetzt die Rückübernahme durch den Fahrer verläuft problemlos), aber überflüssiger Fall ist, wenn ein automatisiertes System eine Situation zwar bewältigen würde, es aber davon ausgeht, dass es zu Problemen kommt. Der Fahrer wird gewarnt und zur Rückübernahme aufgefordert, obwohl dies nicht nötig gewesen wäre. Dieser Fall kann bei ACC-Systemen beobachtet werden. Liegt aus Sicht des ACC eine zu große Verzögerung des Vorausfahrenden vor, wird der Fahrer zur Rückübernahme durch einen akustischen Warnton aufgefordert. In einigen Fällen bewältigt das ACC die Situation des Annäherns aber doch. Ein teilkritischer Fall liegt vor, wenn das System eine Situation nicht bewältigt, dies aber antizipieren kann und den Fahrer zu Rückübernahme auffordert. Dies ist in den meisten Rückübernahmeaufforderungen des ACC der Fall.

		Automation nimmt an, dass es die Situation bewältigt	
		ja	nein
Automation bewältigt Situation	ja	unkritisch, kein Eingriff des Fahrers nötig	unkritisch, aber überflüssige Rückübernahme
	nein	kritisch, notwendiger Eingriff des Fahrers bleibt aus	teilkritisch, Fahrer wird zur Rückübernahme aufgefordert

Tabelle 2: Systematisierung von kritischen Vorkommnissen nach den beiden Merkmalen, ob die Automation eine Situation bewältigt und ob die Automation davon ausgeht, eine Situation zu bewältigen

Das Problem einer reduzierten *Mode Awareness* steigt mit der Anzahl an Systemen, die parallel bedient werden. Nach Wolf *et al.* (2005a) erhöht sich die Beanspruchung des Fahrers zusätzlich durch die Komplexität und Funktionalität moderner Fahrerassistenzsysteme. Es wird empfohlen, ein stimmiges integrierendes Bedienkonzept zu entwickeln (Wolf *et al.*, 2005a). Besonders die simultan, meist über den visuellen Informationskanal aufgenommenen Systeminformationen und die fehlende Transparenz der Systemaktivität (meist aufgrund einer fehlenden adäquaten Rückmeldung) können dazu führen, dass Informationen von Fahrerassistenzsystemen überhaupt nicht wahrgenommen werden (Wolf *et al.*, 2005a). Als Lösungsmöglichkeit schlägt Wolf *et al.* (2005a,b) eine Priorisierungsstrategie vor. In einer Matrix werden über 20 Fahrerassistenzsysteme gegenübergestellt und jede Paarung wird bewertet. So wird beispielsweise einem Front-Collision-Warning-System eine höhere Informationspriorität zugewiesen als einer Rückmeldung eines Kreuzungsassistenten. Dies kann *Mode Awareness* verbessern, es kann aber immer noch, abhängig von der gewählten Interaktionsstrategie, zu einer falschen Zuordnung von Warnungen zu den verschiedenen Assistenzsystemen kommen, was unter dem Begriff *Mode Confusion* zusammengefasst wird.

2.4.6 Bedienbarkeit

Eine fehlerfreie und möglichst wenig zeitintensive Bedienbarkeit von Fahrerassistenzsystemen ist die Grundvoraussetzung dafür, dass ein Interaktionskonzept überhaupt verwendet werden kann. Sind Bedieneingaben nur schwer tätiger und Anzeigen nicht erkennbar, wird sich das sowohl auf die subjektive Beurteilung des Interaktionskonzeptes durch die Versuchspersonen als auch auf objektive Kennwerte, wie die Fehlerhäufigkeit, auswirken. In der Ergonomie wird die Bedienbarkeit meist unter dem Begriff der Usability oder Gebrauchstauglichkeit zusammengefasst, die sich in die drei Faktoren Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit unterteilt (DIN EN ISO 9241 – Teil 11, 1999). In dieser Arbeit wird die Zufriedenheit und damit die Akzeptanz und die Nutzungsfreude nicht berücksichtigt. In Arbeiten des *Institut für Arbeitswissenschaft (TU Darmstadt)* wird dieses Thema, das eng mit der Fahrfreude verknüpft ist, näher betrachtet (Kauer *et al.*, 2010a).

Bei ungünstig gestalteten Mensch-Maschine-Schnittstellen von Fahrerassistenzsystemen kann der Vorteil, den diese Systeme hervorrufen sollen, durch eine schlechte Bedienbarkeit kompensiert werden (Landau, 2002). Wesentliche Schwachpunkte bei der Gebrauchstauglichkeit von Fahrerassistenzsystemen liegen in der fehlenden Kompatibilität zu den Fahreigenschaften sowie der Konsistenz der Bedienung (Landau, 2002). Eine Evaluation der Usability sollte daher im Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen vorge-

sehen werden, um Schwächen möglichst früh aufzuzeigen (Landau, 2002). Aber nicht nur die Mensch-Maschine-Schnittstelle kann die Gebrauchstauglichkeit beeinflussen. Wird ein System unverändert für einen veränderten Nutzungskontext verwendet, ist ebenfalls denkbar, dass sich die Gebrauchstauglichkeit verändert. Didier *et al.* (2008) konnten zeigen, dass ein für die Autobahn und Landstraße gebrauchstaugliches Interaktionskonzept eines ACC-Systems, in der Stadt nicht ohne weitere Anpassungen verwendet werden sollte.

Die Bedienbarkeit von Fahrerassistenzsystemen wird häufig über Fragebögen ermittelt, die auf das jeweilige Versuchsdesign und Assistenzsystem zugeschnitten sind (Didier, 2006; Abendroth, 2001; Bender, 2008), oder es werden standardisierte Fragebögen verwendet, wie beispielsweise die *System Usability Scale* (SUS) nach Brooke (1996) oder der *AttrakDiff* nach Hassenzahl *et al.* (2003).

3 Konzeption und Realisierung der manöverbasierten Fahrzeugführung

In diesem Kapitel wird die Interaktionsentwicklung für die manöverbasierte Fahrzeugführung dargestellt. Der Entwicklungsprozess schließt einige Versuche mit ein, um die Konzeption zu objektivieren und frühzeitig zu untersuchen.

In Kapitel 3.1 wird aufbauend auf einer Recherche nach Modellen, die für die Darstellung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer manöverbasierten Fahrzeugführung in Betracht kommen, ein Modell erstellt, nach dem das Konzept entwickelt wird. Aus dem Modell heraus wird gezeigt, dass eine Definition eines für den Fahrer verständlichen und nachvollziehbaren Manöverkatalogs zwingend erforderlich ist. Aus diesem Grund wird in Kapitel 3.2 eine Diskretisierung von Fahrmissionen auf der Grundlage von Literatur und eigenen Versuchen untersucht. Aus den Versuchen wird ein Prototyp eines Manöverkataloges entwickelt und in einer ersten Evaluation mit Hilfe der *Wizard of Oz*-Technik evaluiert, bei der die Systemreaktionen von einem der Versuchsperson nicht ersichtlichen menschlichen Operator (dem *Wizard*) durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Frühevaluation werden dargestellt und ein endgültiges Konzept, nach dem die Entwicklung des Prototypen der manöverbasierten Fahrzeugführung erfolgen soll, festgeschrieben. Dies stellt nach dem strukturierten Vorgehen von Schmidt *et al.* (2008) den Schritt der Definition der Systemfunktionalität nach einer Frühevaluation dar. Die letzten beiden Kapitel beschäftigen sich mit der Umsetzung der Manöversteuerung am Fahr Simulator. In Kapitel 3.5 wird gezeigt, wie die für die Autobahn erforderlichen Manöver in der Simulationssoftware *STISIM Drive* mit dem Erweiterungspaket *OpenModul* erstellt wurden. Nach Schmidt *et al.* (2008) stellt dies die Funktionsentwicklung dar. Neben dieser Softwareentwicklung muss selbstverständlich ein Bedienelement entworfen werden. Diese Manöverschnittstelle wird in Kapitel 3.6 vorgestellt.

3.1 Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei der Nutzung einer manöverbasierten Fahrzeugführung

Die Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist in der Fahrzeugergonomie ein wesentliches Werkzeug, um komplexe Vorgänge bei dem Führen eines Kraftfahrzeugs vereinfacht darzustellen. Die Konzeption des Ansatzes zur manöverbasierten Fahrzeugführung basiert ebenfalls auf einer Modellvorstellung, die in diesem Kapitel schrittweise entwickelt werden soll. Als Grundlage der Modellierung werden in Kapitel 3.1.1 Anforderungen an ein Modell für die manöverbasierten Fahrzeugführung definiert. Dies soll eine zielgerichtete und auf die wesentlichen Komponenten fokussierte Erstellung einer Modellvorstellung ermöglichen.

Die Literatur zeigt eine Vielzahl an Modellen, die sich mit der Darstellung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion befassen. In Kapitel 3.1.2 wird eine Auswahl dieser Modell vorgestellt, die für eine Beschreibung von assistiertem oder teilautomatisierten Fahren verwendbar sind. Die Passung der bestehenden Modelle wird am Ende von Kapitel 3.1.2 anhand der Anforderungsliste diskutiert.

Die Anforderungen und die recherchierten und systematisierten Modelle werden in 3.1.3 schließlich verwendet, um ein eigenes Modell zu entwickeln.

3.1.1 Anforderungen an ein Modell zur Beschreibung der manöverbasierten Fahrzeugführung

Die Definition von Anforderungen (AF) soll helfen, die wesentlichen Aspekte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion für eine manöverbasierte Fahrzeugführung zu identifizieren und unwichtige Aspekte auszuschließen. Dies ist für die Entwicklung des Modells (vgl. Kapitel 3.1.3) von zentraler Bedeutung. Die Anforderungen leiten sich aus der Literatur, dem *Conduct-by-Wire*-Konzept nach Winner & Heuss (2005) und eigenen Überlegungen ab. Allgemein soll das Wirkungsgefüge, das für die Absolvierung einer Fahrmission benötigt wird, dargestellt werden. Dazu gehören (z. B. nach Donges, 1982) im Wesentlichen der Fahrer, das Fahrzeug und die Umgebung (AF1). Die manöverbasierte Fahrzeugführung ist überwiegend auf dem *Conduct-by-Wire*-Konzept (vgl. Kapitel 2.2.2) aufgebaut (Winner & Heuss, 2005; Winner *et al.*, 2006). Wesentliches Merkmal ist daher eine diskrete Beauftragung von Fahrmanövern vom Fahrer an das Fahrzeug sowie eine Möglichkeit einer Parametrierung dieser Manöver (AF2). Die Kommunikation erfolgt auf *Bahnführungsebene*. Dies bedeutet, dass keine stabilisierenden Aufgaben vom Fahrer übernommen werden müssen. Da die manöverbasierte Fahrzeugführung als Zusatzsystem in einem Fahrzeug mit konventionellen Bedienelementen vorgesehen ist, kann der Fahrer jederzeit auf die *Stabilisierungsebene* zurückkehren und anstatt des „Manövermodus“ das Fahrzeug mit Lenkrad und Pedalen führen (AF3).

Die Darstellung der Manöverebene (*Bahnführungsebene*) ist obligatorisch (AF4), da nur so die Bahnführungsinteraktion erklärt werden kann. Die Herleitung des Grundprinzips von *Conduct-by-Wire*, und somit auch der manöverbasierten Fahrzeugführung, basiert auf dem Konzept der Einteilung der Fahraufgabe in die Stufen *Navigation*, *Bahnführung* und *Stabilisierung* (Donges, 1982; Bernotat, 1970). Zumindest die beiden letztgenannten Stufen sind für die Erläuterung einer Manöversteuerung nach Winner & Heuss (2005) notwendig und müssen daher in das Modell miteinbezogen werden (AF5). Dies impliziert ebenfalls, dass der Übergang zwischen den beiden Automationsstufen (manöverbasiert und konventionell) dargestellt werden muss (AF6), da an diesen Stellen Probleme auftreten können (Schieben & Flemisch, 2008). Nach Schieben & Flemisch (2008) spricht man beim Wechsel der Automationsstufe auch von einer *Transition*. Solche *Transitionen* werden durch bestimmte Ereignisse einer Fahrmission ausgelöst. Diese Ereignisse können allgemein über eine Rückführung des Ergebnisses der Fahrerentscheidung (AF7) dargestellt werden (Wickens & Hollands, 2000). Für die Entwicklung einer manöverbasierten Fahrzeugführung ist die Bereitstellung eines Manöverkataloges notwendig (AF8). Ohne einen für den Fahrer nachvollziehbaren Auswahlkatalog an Manövern kann die Interaktion nicht vollzogen werden.

Es ist zu erwarten, dass sich die Mensch-Maschine-Schnittstelle einer manöverbasierten Fahrzeugführung deutlich von den herkömmlichen Bedienelementen unterscheidet (Flemisch *et al.*, 2008). Die Darstellung von verschiedenen Mensch-Maschine-Schnittstellen ist daher ebenfalls in die Modellentwicklung einzubeziehen (AF9).

Bei der manöverbasierten Fahrzeugführung werden im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung andere Schwerpunkte im Informationsverarbeitungsprozess gesetzt. Die Handlungsausführung wird beispielsweise auf das Fahrzeug übertragen, Entscheidungsprozesse über die Bahnführung bleiben zum Großteil beim Fahrer. Daher müssen die verschiedenen Stufen der Informationsverarbeitung dargestellt werden (AF10).

Eine wesentliche Fragestellung der Interaktionsentwicklung ist die mentale Beanspruchung des Fahrers. Durch die bewusste Übergabe von Bahnführungscommandos (den

Manövern) kann es zu einer erhöhten mentalen Beanspruchung kommen, da zum Teil unbewusst ablaufende Vorgänge bewusst bearbeitet werden müssen. Im Idealfall ist die Interaktion, unterstützt durch eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle, der manöverbasierten Fahrzeugführung so gestaltet, dass sie eine Beauftragung von Manövern durch den Fahrer weitestgehend ohne erhöhten kognitiven Anteil erlaubt. Um dies abzubilden, muss das Modell eine Darstellung beinhalten, die Bedienaktionen mit niedrigem und hohem kognitiven Anteil berücksichtigt (AF11). Alle Anforderungen sind in der folgenden Liste nochmals zusammengefasst.

- AF1** Die Systemelemente *Fahrer*, *Fahrzeug* und *Umfeld* müssen in der Darstellung des Modells enthalten sein.
- AF2** Eine diskrete Manöverbeauftragung und Parameterübergabe muss im Modell enthalten sein.
- AF3** Die Stabilisierungsaufgabe (konventionelle Fahrzeugführung) des Fahrers muss im Modell enthalten sein.
- AF4** Der manöverführende (bahnführende) Teil der Fahraufgaben muss im Modell enthalten sein.
- AF5** Die Aufteilung der Fahrzeugführungsaufgabe muss zumindest die Kategorien *Stabilisierungsebene* und *Bahnführungsebene* beinhalten.
- AF6** Es müssen mehrere Systemzustände (zumindest die manöverbasierte und konventionelle Fahrzeugführung) im Modell enthalten sein.
- AF7** Eine Rückführung des Systemzustandes an den Fahrer muss im Modell enthalten sein.
- AF8** Ein „fahrerseitiger“ Manöverkatalog muss im Modell enthalten sein.
- AF9** Die Darstellung von Mensch-Maschine-Schnittstellen muss im Modell enthalten sein.
- AF10** Es müssen die verschiedenen Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung im Modell enthalten sein.
- AF11** Es müssen verschiedene Kognitionsintensitäten des Entscheidungsprozesses in der menschlichen Informationsverarbeitung im Modell enthalten sein.

3.1.2 Modelle zur Beschreibung des Fahrerverhaltens

Eine große Bandbreite an Modellen zur Fahrer-Fahrzeug-Interaktion und zum Fahrerverhalten sind in der Literatur dokumentiert. Ein Systematisierungsansatz ist in Michon (1984) zu finden, der diese Modelle in die Dimensionen *Taxonomisch* oder *Funktional* und *Input/Out* oder *Innerer Zustand* einteilt (vgl. Tab. 3). In dieser Systematisierung, der in dieser Arbeit gefolgt wird, werden die Modelltypen der *Task Analysis* (Aufgabenanalyse), *Trait Models* (Charaktereigenschaftsmodelle), *Mechanistic Models* (Mechanistische Modelle), *Adaptive Control Models* (Adaptive-Kontroll-Modelle), *Motivational Models* (Motivationsmodelle) und *Cognitive (Process) Models* (Kognitionsmodelle) eingeordnet. Ausgehend von einer Auswahl von denen in Michon (1984) beschriebenen Modellen

werden weitere aktuellere Modelle herangezogen und erklärt, die für die Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eines manöverbasierten Ansatzes in Frage kommen. Auf Grund der Vielzahl der Modelle wird daher hier auf eine vollständige Darstellung des Fahrer-Fahrzeug-Modells verzichtet. Einen umfassenden Überblick über ältere Modelle (vor 1984) ist in Michon (1984) zu finden, neuere Modelle sind in Jürgensohn (1997) und Johannsen (2006) dargestellt.

Da besonders kognitive Aspekte für die Modellierung wichtig sind, stützt sich die Recherche auf die Zusammenfassung von Modellen der menschlichen Informationsverarbeitung nach (Schlick *et al.*, 2010, S. 286 ff). Dort wird ein umfassender Überblick gegeben, einige dieser Modelle bedürfen allerdings einer Anpassung an die Fahrzeugführung.

	Taxonomic	Functional
Input–Output (Behavioral)	Task Analysis	Mechanistic Models Adaptive Control Models - Servo–Control - Information Flow Control
Internal State (Psychological)	Trait Models	Motivational Models Cognitive (Process) Models

Tabelle 3: Systematisierung von Fahrerverhaltensmodellen nach Michon (1984)

Für die Modellierung der gesamten Fahrer-Fahrzeug-Interaktion einer manöverbasierten oder, allgemeiner ausgedrückt, einer teilautonomen Fahrzeugführung kommen *taxonomische Modelle* weniger in Betracht, da diese im Wesentlichen ein Inventar an Handlungs-/Arbeitsschritten darstellen, die in eine sequentielle Reihenfolge gebracht werden. Dies gilt sowohl für die *Task Analysis*, (vgl. McKnight & Adams, 1970 für eine umfassende *Task Analysis* mit über 1 700 Einzelaufgaben bei Führen eines Fahrzeugs) als auch für die *Trait Models* (vgl. Fleishman, 1975 für eine Taxonomie von Fähigkeiten des Menschen). Besonders die Limitation, dass keine dynamischen Prozesse abgebildet werden können, ist für die Modellbildung hinderlich und ist nicht mit den Anforderungen, die in Kapitel 3.1.1 aufgestellt wurden, vereinbar.

Für die Modellierung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eines manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes bleiben die *Functional Models*. Dabei wird speziell der Bereich der *Adaptive Control Models* (Kategorie *Input/Output* sowie die *Motivational Models* und *Cognitive Models* (Kategorie „Innere Zustand“) diskutiert. Die *Mechanistic Models* sind nach Michon (1984) nur von untergeordneter Bedeutung, da diese keine dynamischen Veränderungen des Fahrers über die Zeit erlauben. Herman *et al.* (1959), aufbauend auf Chandler *et al.* (1958), stellt ein mechanistisches Modell über Fahrzeugkolonnen vor, in dem er ihr Verhalten nach den mechanistischen Gesetzen von inkompressiblen Flüssigkeiten modellierte. Nach Michon (1984) wird aus solchen mechanistischen Modellen allerdings durch die Annahmen über das Fahrerverhalten (z. B. Minimierung der Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug) ein Adaptive Control Modell.

Adaptive Control Models: Servo Control Models Die Fahrzeugführung wird als kontinuierlicher Fluss von Signalen modelliert. Besonders im Bereich von Fahrzeugstabilisierungsaufgaben haben sich einige Modelle etabliert (vgl. McRuer *et al.*, 1977 für ein Modell der *Kompensationsregelung*, Johannsen, 2006 für ein *Optimaltheoretisches Modell* des Menschen im Mensch-Maschine-Regelkreis). Diese regelungstechnischen Modelle sind insbesondere für die Nachbildung der Querführungsaufgabe entwickelt worden und besitzen den Vorteil, dass ohne die Kenntnis der inneren Struktur der menschlichen Informationsaufnahme, -verarbeitung und -ausgabe kausale Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des Fahrers gemacht werden können (Donges, 2009). In Abb. 6 ist die allgemeine Darstellung der Kompensationsregelung für den Menschen als Regler als einschleifiger Regelkreis dargestellt (Johannsen *et al.*, 1976). Ausgehend von einer der Zeit t abhängigen und für den Menschen über eine Anzeige wahrnehmbaren Regeldifferenz $e(t)$ zwischen Führungsgröße $r(t)$ und der Regelgröße $y(t)$ versucht der Mensch als Regler möglichst $e(t)$ zu minimieren. Demzufolge soll die Regelabweichung $e(t) = r(t) - y(t)$ möglichst ständig Null sein, obwohl die Störgröße $w(t)$ auf die Regelstrecke einwirkt. Dazu erzeugt der Mensch über das Bedienelement die Stellgröße $u(t)$ und wirkt somit auf die Regelstrecke ein. Das Ergebnis seiner Stellgröße $u(t)$ wird dem Regler Mensch wieder über die Regeldifferenz $e(t)$ angezeigt. Der Mensch als Regler kann so über elektronische Anzeigen und Bedienelemente in Echtzeit mit dem Fahrzeug (hier Regelstrecke) im Regelkreis zusammenwirken (Johannsen, 2006).

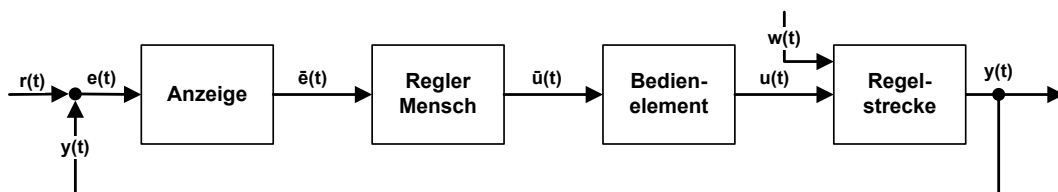


Abbildung 6: Mensch als Regler, Kompensationsregelung (Johannsen *et al.*, 1976)

Dieser einschleifige Grundansatz wurde von Donges (1978) für die Entwicklung eines auf mehreren Schleifen operierenden Zwei-Ebenen-Modells für das menschliche Querregelverhalten beim Führen eines Kraftfahrzeugs verwendet. Das Modell (vgl. Abb. 7) wird in die Teilmodelle *Führungsebene* und *Stabilisierungsebene* separiert sowie in den Block der Restgröße, der den nicht durch die beiden Ebenen erklärten Anteil der Fahrerreaktion zum Lenkwinkel erklärt. Die Führungsebene wird als *Antizipatorische Steuerung* dargestellt, die Open-Loop-Eigenschaften aufweist. Die *Stabilisierungsebene* ist die erwähnte kompensatorische Regelung, die in diesem Fall allerdings mehrere Rückführungsgrößen besitzt. Das Modell ist für den querdynamischen Anteil der Fahraufgabe aufgestellt und validiert worden, ist jedoch nach der Grundstruktur auch auf die Nachbildung der Längsdynamik anwendbar (Donges, 2009). Es basiert auf einer Fahrsimulatoruntersuchung auf einer kurvenreichen Strecke. Die Versuchspersonen wurden in der Versuchseinweisung aufgefordert, immer genau der Straßenmittellinie und einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil zu folgen, was in diesem Fall den Verzicht auf eine Ableitung der Solltrajektorie durch den Fahrer rechtfertigt.

Eingangsgröße der *Antizipativen Steuerung* ist die um die Antizipationszeit T_a vorgezogene Sollkrümmung der Sollspur (hier Fahrbahnmittellinie), die über einen Verstärkungsfaktor und ein glättendes Verzögerungsglied den antizipatorischen Anteil des Lenk-

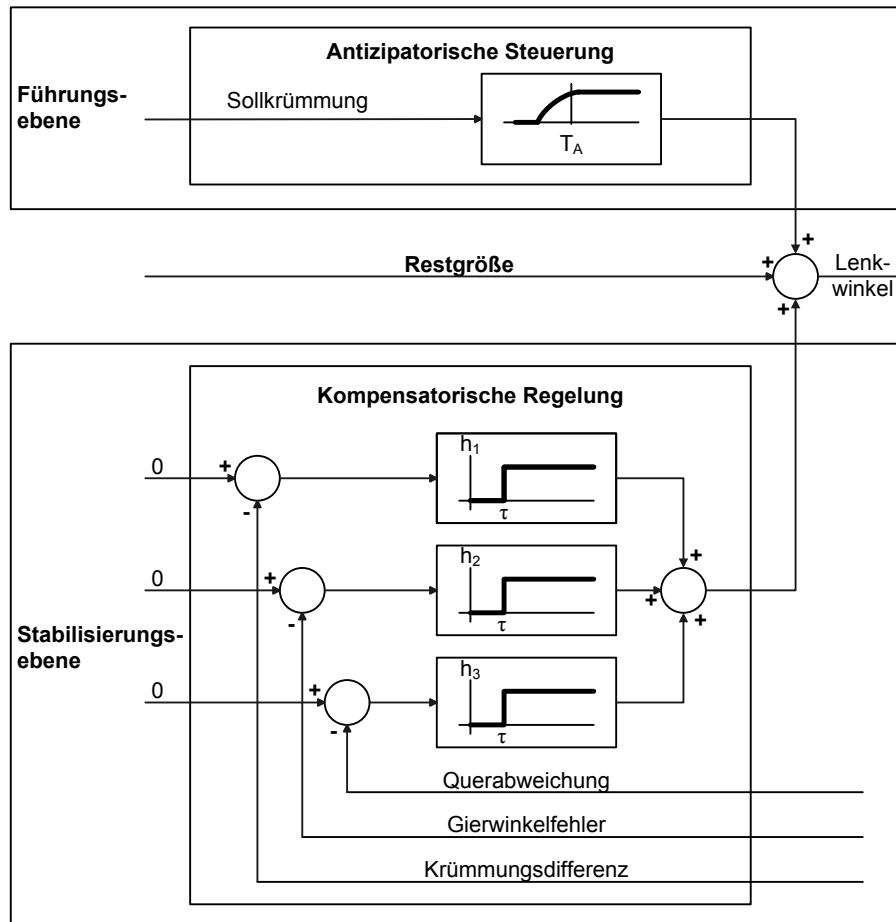


Abbildung 7: Blockschaltbild des Zwei-Ebenen-Modells für das Fahrerlenkverhalten (Donges, 1978, 2009)

winkels darstellt (Donges, 1978). Für die kompensatorische Regelung werden parallel die drei Zustandsgrößen Krümmungsdifferenz (Differenz der Krümmungen von Soll- und Istspur), Gierwinkelfehler (Winkel zwischen Tangente an die Sollspur und Fahrzeuglängsachse) und Querabweichung zur Sollspur verwendet, die jeweils über einen Verstärkungsfaktor und einem Totzeitglied dem Lenkwinkel zugeführt werden.

Adaptive Control Models: Information Flow Control Models Zu den *Adaptive Control Models* gehören ebenfalls die *Information Flow Control Models* (Informationsflussdiagramme), die den Fluss der Information des Fahrers über die diskreten Elemente *Operation*, *Verzweigung* (auch Entscheidung) und *Pfeil* in einen Zusammenhang bringen. Betrachtet man eine Kreuzungssituation, an die sich der zu modellierende Fahrer annähert, existiert im gesamten Informationsflussdiagramm beispielsweise eine *Verzweigung* „Kreuzendes Fahrzeug von rechts“ und eine *Operation* „Verzögern“, die durch Pfeile verbunden sind (Kidd & Laughery, 1964). Diese Art der Modellierung wird häufig bei der Erstellung von Softwareprogrammen verwendet und ist in der DIN 66001 (1983) festgelegt. Die dort verwendeten Definitionen der Elemente lassen sich weitgehend auf die Mensch-Maschine-Interaktion übertragen. Diese Art der Modellierung ist geeignet, um spezielle Situationen mit deren Handlungsalternativen genauer zu definieren, sie eignet sich allerdings nicht,

um allgemeine kognitive Prozesse abzubilden (Michon, 1984). Im Grunde kann das Informationsflussdiagramm nach Kidd & Laughery (1964) als eine dynamische Task Analysis angesehen werden. Auch der Detaillierungsgrad der Informationsflussdiagramme kann stark variieren. Auf einem hohen Detaillierungsniveau werden einfache Situationen vor allem durch viele mögliche Entscheidungen schnell komplex in der Darstellung (vgl. Laughery *et al.*, 1967 für die Darstellung der Situation „Warten an Stoppschild“ bei der acht „Operationen“ und neun Entscheidungsknoten benötigt werden). Die gesamte Fahrzeugführungsaufgabe (Bahnführung) als Informationsfluss darzustellen ist in Rühmann & Bubb (2006) enthalten und in Abb. 8 dargestellt.

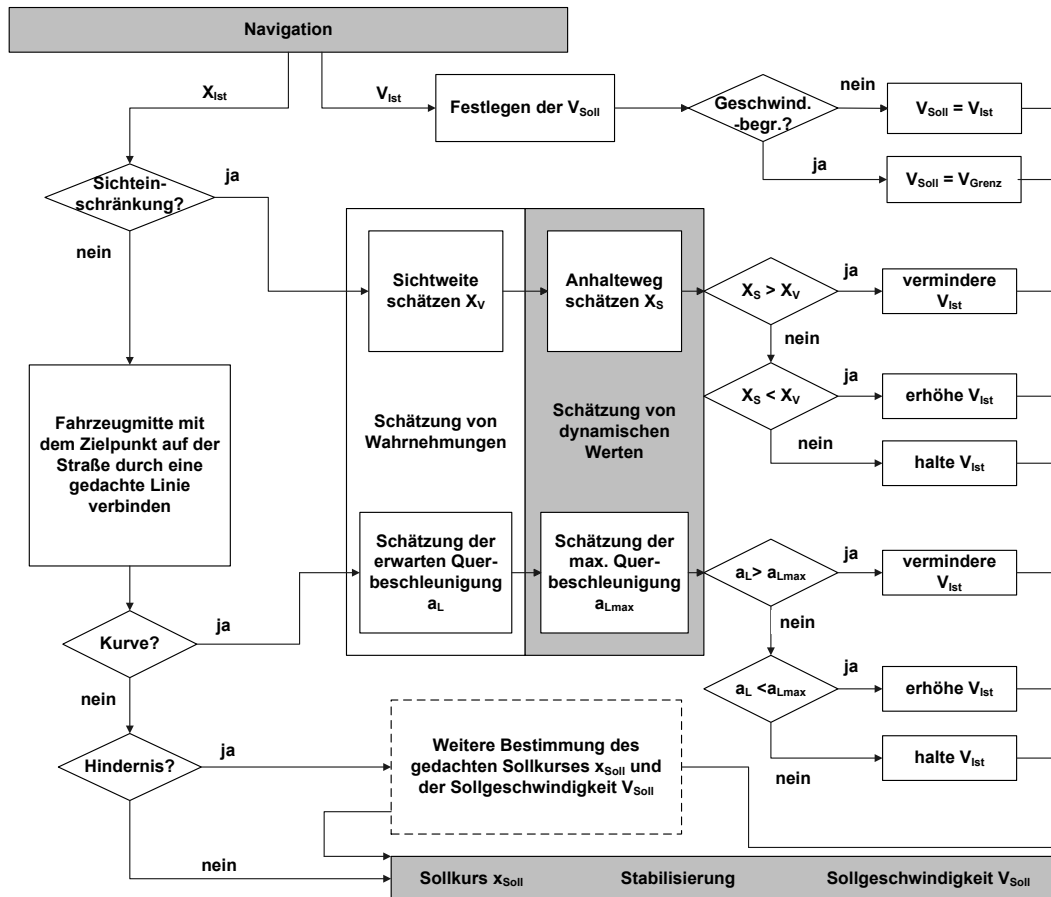


Abbildung 8: Informationsflussdiagramm für die Führung eines Kraftfahrzeugs nach Rühmann & Bubb (2006)

Ausgehend von der Navigation wählt der Fahrer eine Wunschgeschwindigkeit und eine Spurlage. Über verschiedene Entscheidungsknoten werden die Sollgeschwindigkeit und der Sollkurs festgelegt. Für die weitere Behandlung der *Information Flow Control Models* wird das Modell nach Rühmann & Bubb (2006) verwendet.

Weitere Anwendungsbereiche der Informationsflussdiagramme im Bereich der Fahrzeugführung sind die Darstellung des Informationsflusses bei der Nutzung von ACC (Rühmann & Bubb, 2006) und die Erweiterung des Informationsflussdiagramms um ein Element für die Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Definition der Darstellung der Anzeigeelemente für die manöverbasierte Fahrzeugführung (Kauer *et al.*, 2010b).

Motivational Models Im Bereich der *Motivational Models* gibt es eine große Zahl an Modellen, die das Fahrerverhalten meist auf der Basis der Risikoabwägung beschreiben. Auf eine vollständige Darstellung muss hier verzichtet werden, es sei aber auf die ausführliche Systematisierung von Michon (1984) verwiesen. Exemplarisch wird das häufig zitierte Modell aus diesem Bereich, das Risikohomöostase-Modell nach Wilde (1982), vorgestellt. In Abb. 9 ist das vereinfachte Aufgabenanalyse-Modell nach Wilde (1982) dargestellt, nach dem die Risikohomöostase-Theorie entwickelt wurde.

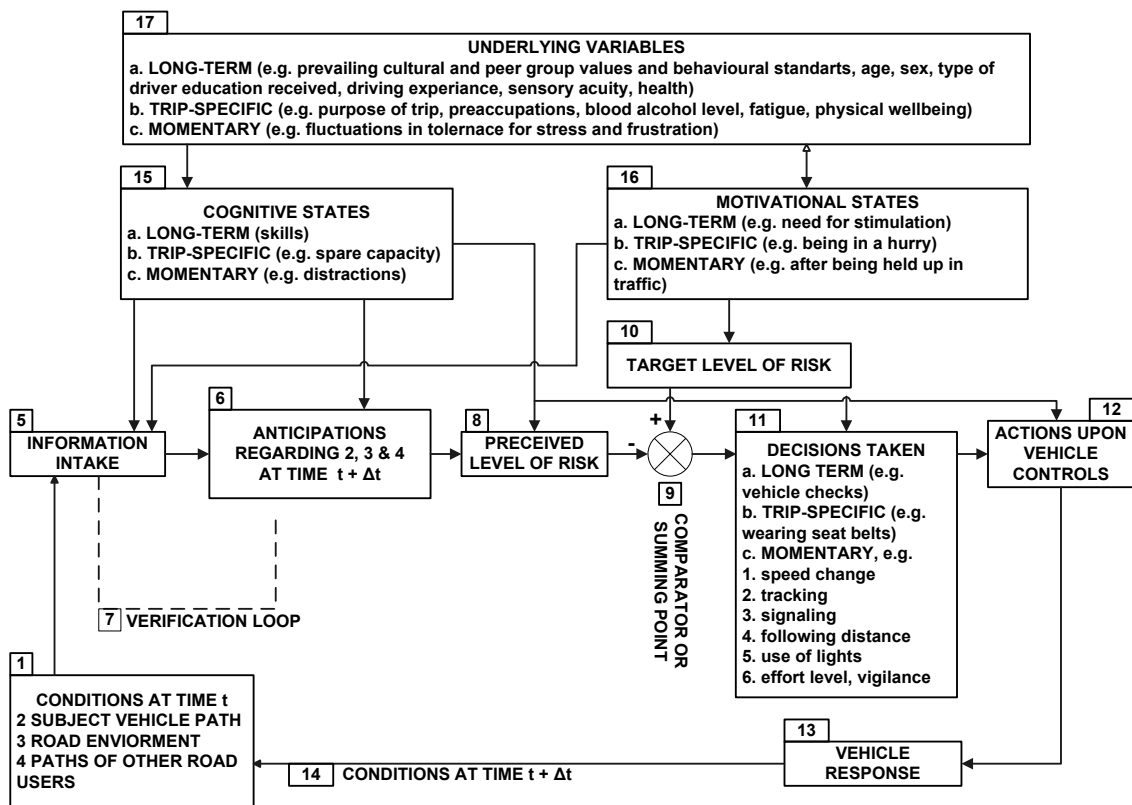


Abbildung 9: Aufgabenanalyse-Modell zur Erklärung von Risikohomöostase nach Wilde (1982)

Ausgehend von den Gegebenheiten der Fahrsituation (1), zu denen die Trajektorie des Fahrers (2) und der anderen Verkehrsteilnehmer (4) sowie weitere Bedingungen des Fahrumfeldes (3) gehören, nimmt der Fahrer verschiedene Informationen auf (5) und bildet daraus eine Antizipation der Situation in den nächsten Sekunden. Aus dieser Repräsentation der möglichen Entwicklung der Fahrsituation wird ein subjektiv wahrgenommenes Risikoniveau ermittelt (8) und mit der für den jeweiligen Fahrer bestehenden Risikobereitschaft (10) verglichen. Nach Wilde (1982) ergibt dieser Vergleich 0. Anhand dieses Vergleiches wird die Handlungsauswahl (11) und die Handlungsausführung (12) getroffen. Ist das wahrgenommene Risikoniveau (8) größer als die Risikobereitschaft (10) könnte der Fahrer in einer Folgefahrt beispielsweise seine Zeitlücke zu einem vorausfahrenden Fahrzeug vergrößern. Die Handlungsausführung (12) beeinflusst wiederum die Fahrzeugreaktion (13), die schließlich eine Veränderung der Gegebenheiten der Fahrsituation (1) hervorruft.

Das Aufgabenanalyse-Modell aus Abb. 9 wurde von Wilde (1982) mehrfach verändert und erweitert, um verschiedene Beispiele zu erläutern. Ein für die Entwicklung einer

manöverbasierten Fahrzeugführung gut geeignetes Beispiel ist die Einführung einer Sicherheitsmaßnahme, wie beispielsweise die Gurtpflicht, aber auch die Einführung von Fahrerassistenzsystemen wie ABS (vgl. Aschenbrenner & Biehl, 1994 und Sagberg *et al.*, 1997). Der Zusammenhang ist in Abb. 10 dargestellt.

Ausgehend von der Einführung einer Sicherheitsmaßnahme (g) wird vom Fahrer eine unbewusste Einschätzung der Einführung dieser Sicherheitsmaßnahme auf die Unfallwahrscheinlichkeit hin getroffen. Diese Einschätzung bewirkt, dass die Gleichung *Risikobereitschaft (a) – wahrgenommenes Risiko (b) = 0* zu *Risikobereitschaft (a) – wahrgenommenes Risiko (b) – Risikoreduktion durch Sicherheitsmaßnahme (h) = 0* wird und somit die Risikobereitschaft (a) größer wird.

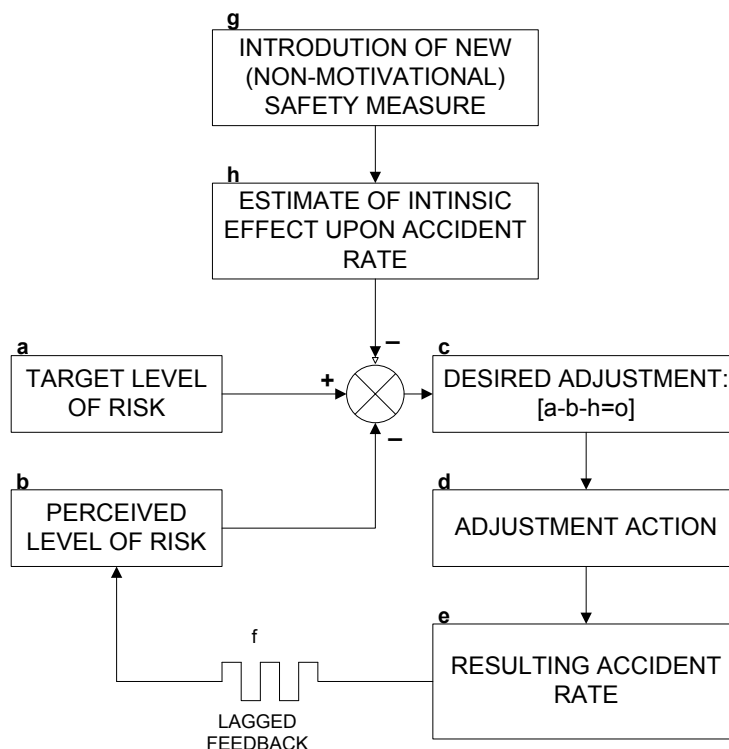


Abbildung 10: Risikohomöostase bei der Einführung einer neuen Sicherheitsmaßnahme nach Wilde (1982)

Cognitive (Process) Models Eines der bekanntesten Modelle in diesem Gebiet ist das Stufenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung von Wickens & Hollands (2000, S. 11 ff), das als Rahmenwerk für die Analyse verschiedener psychologischer Prozesse bei der Interaktion mit technischen Systemen dient. Die zwei wesentlichsten Eigenschaften dieses Modells sind die Repräsentation der Informationsverarbeitung durch aufeinander folgende Stufen, die eine Transformation des durchlaufenden Signals bewirken, sowie das Vorhandensein einer Rückkopplungsschleife, die impliziert, dass es keinen fixen Startpunkt im Modell gibt. Die Verarbeitung kann sowohl extern angestoßen werden (System Environment) als auch internen Charakter haben, wenn der Mensch aus einer inneren Motivation den Prozess starten lässt. Grundlage für dieses Modell, wie auch die meisten anderen Stufenmodelle der menschlichen Informationsverarbeitung, ist das sequentielle Stufenmodell nach Welford (1960), das in die Stufen *Perzeption (Perceptual*

Mechanism), Umsetzung (*Translation Mechanism*) und Zentrale Ausgabe (*Central Effector Mechanism*) unterteilt ist. Diese Stufen sind im Stufenmodell nach Wickens & Hollands (2000) ebenfalls enthalten bzw. in mehrere Unterstufen aufgeteilt, wie in Abb. 11 dargestellt ist.

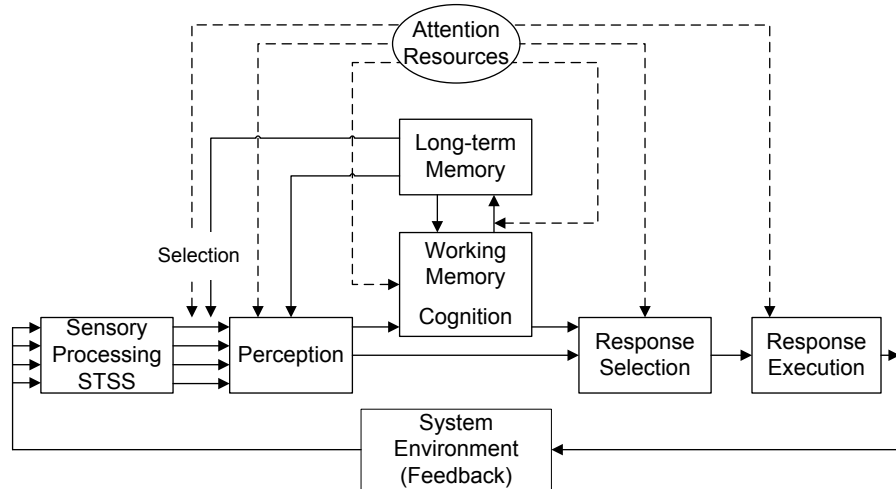


Abbildung 11: Stufenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens & Hollands (2000)

Der Perzeption ist noch ein Sensorischer Kurzzeitspeicher (STSS = Short Time Sensory Store) vorgeschaltet, der einen zeitlich begrenzten Speicher (ca. 0,5 s für visuelle und bis zu 2 s für akustische Reize) für die unverarbeiteten Stimuli aus der Umgebung darstellt (Wickens & Hollands, 2000). Im deutschen Sprachgebrauch wird meist vom Entdecken oder Wahrnehmen gesprochen (Schlick *et al.*, 2010; Luczak, 1975). Dem STSS schließt sich die Perception-Stufe an, die für die Interpretation der wahrgenommenen Stimuli zuständig ist. Einem über den STSS wahrgenommenen Stimulus wird so eine Bedeutung zugeordnet, was mit einem Erkennen oder Identifizieren gleichgesetzt werden kann (Begriffe nach Luczak, 1975). Nachdem Stimuli erkannt worden sind, werden diese entweder direkt zur Stufe der *Response Selection* weitergeleitet oder es erfolgt zuvor eine Verarbeitung durch das Arbeitsgedächtnis in der Stufe *Working Memory/Cognition*. Die Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis beinhaltet nach Wickens & Hollands (2000) beispielsweise das gedankliche Durchgehen oder ein Schlussfolgern, um eine Lösung eines Problems zu finden. Die Kognition benötigt im Allgemeinen längere Zeit, größeren mentalen Aufwand und Aufmerksamkeit. In einigen sequentiellen Modellen werden die Stufen *Cognition* und *Response Selection* zusammengefasst dargestellt (Welford, 1960; Luczak, 1975), was unter Entscheiden zusammengefasst werden kann. Dies nimmt allerdings die Möglichkeit einer direkten Verbindung des *Perception*- mit dem *Response Selection*-Block, die im Fall des Führens eines Kraftfahrzeugs gerade für stabilisierende Tätigkeiten (z.B. die [unbewusste] Wahl eines Lenkradwinkels, um das Fahrzeug im Fahrstreifen zu stabilisieren) von Relevanz ist. Ist eine Handlungsauswahl getroffen worden, wird diese in der Stufe *Response Execution* ausgeführt. Dies kann beispielsweise das Betätigen eines Schalters oder ein Bewegen am Lenkrad sein. Eine Trennung von *Response Selection* und *Response Execution* ist von Bedeutung, da die motorischen Fertig- und Fähigkeiten nur in die *Response Execution*-Stufe einfließen.

Neben der Aufteilung in eine größere Anzahl an sequentiellen Stufen, ist eine zu regelnde Aufgabe oder ein zu regelndes System (in Analogie zur Regelungstechnik kann man auch von einer Regelstrecke sprechen) und eine Rückkopplungsschleife im Modell nach Wickens & Hollands (2000) hinzugekommen. Dies stellt für die Darstellung der Fahrzeugführungsaufgabe (mit und ohne Nutzung von Fahrerassistenzsystemen) eine weitreichende Verbesserung dar. Es können somit auch Änderungen des Systems (z. B. durch die Einführung eines Fahrerassistenzsystems) in die Modellbetrachtung einfließen.

Ein weiteres in der Ergonomie oft angewandtes Modell der menschlichen Informationsverarbeitung ist das SRK-Modell (skill-based, rule-based, knowledge-based) nach Rasmussen (1983), das auf der Basis der Unterscheidungsmerkmale fertigkeitsbasiertes (skill-based), regelbasiertes (rule-based) und wissensbasiertes (knowledge-based) Verhalten sowie der Art der Information, die von der Umwelt bereitgestellt wird (Signale, Zeichen und Symbole), aufgebaut ist (vgl. Abb. 12). Die unterste Ebene des Modells stellt das fertigkeitsbasierte Verhalten da. Diese Ebene wird auch als sensumotorische Ebene bezeichnet und repräsentiert erlernte und automatisiert ablaufende Handlungsmuster (Schlick *et al.*, 2010; Rasmussen, 1983). Diese Reiz-Reaktions-Mechanismen laufen überwiegend unbewusst über die Verarbeitung von Signalen und in sehr kleinen Zeitspannen ab (< 1 s). Überträgt man dies auf das Führen eines Kraftfahrzeugs, sind dies überwiegend stabilisierende Aufgaben, wie beispielsweise das Halten des Fahrzeugs auf einem Fahrstreifen (Donges, 1996; Schlick *et al.*, 2010).

Auf regelbasierter Ebene werden über eine Merkmalsextraktion bestimmte Zeichen erkannt und mit den vom Menschen erlernten Regeln und Schemata, die durch häufiges Erleben von Situationen gebildet werden, assoziiert. Die nach subjektiver Erfahrung effektivste Regel wird ausgewählt und abgerufen (Donges, 1996). Regelbasiertes Verhalten setzt demnach ein Repertoire an Regeln voraus, auf das der erfahrene Nutzer zurückgreifen kann. Dies impliziert, dass dieses Modell nur für trainierte Nutzer gilt (Rasmussen, 1983). Übertragen auf die Fahrzeugführung wird bei der Zufahrt auf eine Kreuzung ohne Vorfahrtsbeschilderung die Regel „Rechts vor Links“ abgerufen. Die Zeitspanne, die für regelbasiertes Verhalten benötigt wird, liegt im Bereich von wenigen Sekunden (Michon, 1984).

Liegen komplexe und unbekannte Situationen vor, agiert der Nutzer auf der wissensbasierten Ebene, die als Eingangsgröße aus der Merkmalsextraktion Symbole erhält. Dort kann nicht auf vorhandene Prozeduren zurückgegriffen werden, sondern es muss eine neue Handlungsstrategie entwickelt werden. Im Fahrzeug sind dies nach Donges (1996) überwiegend Navigationsaufgaben. Die Planung einer Route für eine Strecke, die nicht häufig durchfahren wird, ist ein Beispiel für wissensbasiertes Verhalten beim Führen eines Kraftfahrzeugs. Die benötigte Zeit kann hier stark variieren, liegt aber üblicherweise deutlich über der Zeitspanne für regelbasiertes Verhalten im Bereich von einigen Sekunden bis wenigen Minuten.

Für die Fahrzeuergonomie sind sowohl das Modell nach Wickens & Hollands (2000) aufgrund der Rückführung des Handlungsergebnisses sowie der Einbeziehung der Umwelt als auch das Modell nach Rasmussen (1983) wegen der guten Übertragbarkeit zu den fahrerrelevanten Tätigkeiten nützlich. Einen Ansatz zur Integration beider Modelle ist in Abendroth (2001) zu finden. Das beschriebene Modell war die Grundlage für die Untersuchungen zu ACC-Systemen.

Ein weiteres Modell, das in der Modellierung der Fahrzeugführung oft verwendet wird, ist die Drei-Ebenen-Hierarchie nach Donges (1982), die bereits in Kapitel 2.1 vorgestellt wurde. Das Modell lässt sich in die vorgestellten Modelltypen nur schwer einordnen, da

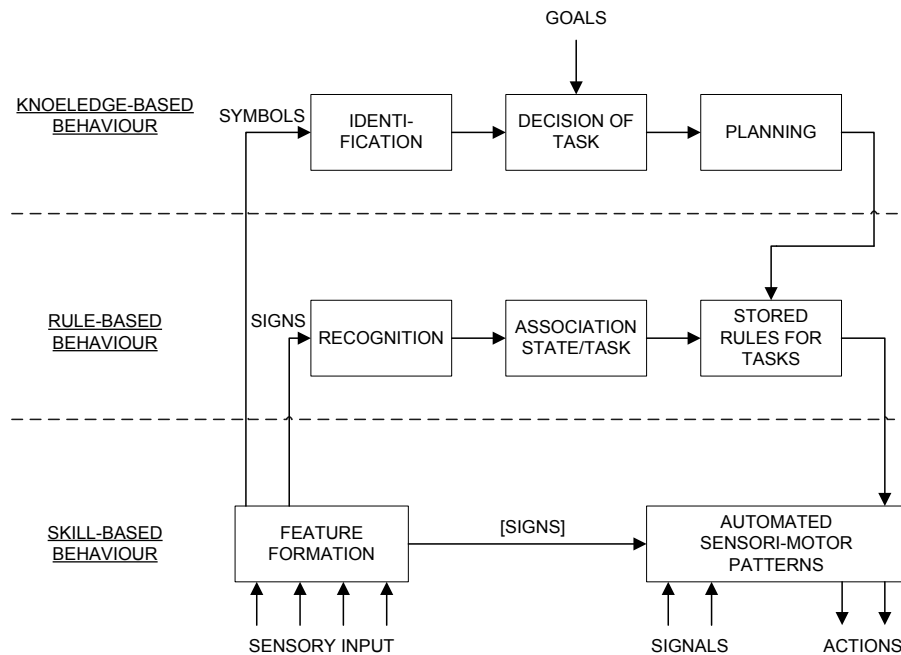


Abbildung 12: SKR-Modell (skill-based, rule-based, knowledge-based behavior) nach Rasmussen (1983)

weder kognitive und motivatorische Anteile abgebildet werden, noch ein klassisches regelungstechnisches Modell vorliegt. In die von Michon (1984) vorgeschlagene Systematisierung aus Tab. 3 ist es unter die verhaltensorientierten-funktionalen Modelle einzugliedern. Das Modell wird in die Darstellung der Fahrer-Fahrzeug-Modelle miteinbezogen, da es das Umfeld in die Betrachtung miteinbezieht und dies im Gegensatz zu Wickens & Hollands (2000) direkt auf die Fahrzeugführung bezieht. Es ist aber auch von besonderem Interesse, da das *Conduct-by-Wire*-Konzept, das die Grundlage für die Entwicklung des manöverbasierten Fahrzeugführungsansatzes ist, direkt auf das Modell von Donges (1982) aufbaut.

Anforderungserfüllung der vorgestellten Modelle Die in Kapitel 3.1.1 aufgestellten Anforderungen werden mit den vorgestellten Modellen verglichen, um vorhandene und etablierte Modellvorstellungen für die Modellbildung einer manöverbasierten Fahrzeugführung zu nutzen. In Tab. 4 sind die vorgestellten Modelle den Anforderungen gegenübergestellt. Eine grau hinterlegte Zelle weist auf eine vollständige Anforderungserfüllung hin. Sind Anforderungen zum Teil durch ein Modell erfüllt, ist die Zelle hellgrau hinterlegt. Ist die Zelle nicht ausgefüllt, wird die Anforderung durch das entsprechende Modell nicht erfüllt. Zusätzlich zu den vorgestellten Modellen dieses Kapitels, wird die erweiterte Kompensationsregelung aus Kapitel 2.1 nach Johannsen (1976) in die Betrachtung miteingeschlossen.

Die Kompensationsregelung nach Johannsen *et al.* (1976) und das Zwei-Ebenen-Modell nach Donges (1978) erfüllen ähnliche Anforderungen (vgl. Tab. 4). Es ist eine Trennung in die Systemelemente *Fahrer (Regler Mensch)* sowie *Fahrzeug* und *Umfeld (Regelstrecke)* gegeben. Beide Modelle unterscheiden nicht in Fahrzeug und Umfeld und erfüllen daher Anforderung 1 nur zum Teil.

Die regelungstechnischen Modelle im Bereich der Fahrzeugführung fokussieren häufig auf das Querregelverhalten des Fahrers. Stabilisierende Anteile sind dort wie in den Modellen nach Johannsen *et al.* (1976) und Donges (1978) enthalten und erfüllen somit Anforderung 3 nach der Darstellung von Stabilisierungsaufgaben. Anforderung 3 wird für das Modell nach Donges (1978) jedoch nicht vollständig erfüllt, da sich die Stabilisierung nur auf die Querführung bezieht. Die Rückführung des Systemzustandes unterscheidet die Steuerung von der Regelung und ist daher in den regelungstechnischen Modellen enthalten und erfüllt somit Anforderung 7.

Anforderung 9 nach der Einbeziehung von Mensch-Maschine-Schnittstellen ist im Modell nach Johannsen *et al.* (1976) explizit über den Systemblock *Bedienelement* und im Modell nach Donges (1978) implizit über die Übergaben eines Lenkradwinkels λ vom Systemblock *Fahrer* zum Systemblock *Fahrzeug* und *Straßengeometrie* gegeben.

Das Modell nach Johannsen *et al.* (1976) erfüllt die Anforderung gänzlich nach einer Darstellung der Stabilisierungsaufgabe. Die Anforderung wird zum Teil auch von dem Drei-Ebenen-Modell von Donges (1982) erfüllt, das allerdings nicht mehr strikt als Regelkreis dargestellt wird. Das Modell nach Johannsen (1976) aus Kapitel 2.1 (erweiterte Kompensationsregelung) ist von seiner Grundstruktur ähnlich der einfachen Kompensationsregelung nach Johannsen *et al.* (1976). Unterschiede bestehen jedoch hinsichtlich der Anforderungen 4 und 6. Prinzipiell ist durch die Erweiterung des Modells nach Johannsen (1976) durch einen *Automatic Controller* die Kompensationsregelung auch geeignet, verschiedene Systemzustände abzubilden (AF6). Dies schließt ebenfalls mit ein, dass der bahnführende Teil zumindest teilweise abbildbar ist (AF4), auch wenn dies eine weitere Anpassung des Modells nötig macht. Anforderung 9 fordert, dass die Mensch-Maschine-Schnittstelle abbildbar ist.

Für die Interaktionsentwicklung wird das Modell nach Donges (1978) ausgeschlossen, da die Erfüllung der Anforderungen identisch mit der *Kompensationsregelung* nach Johannsen *et al.* (1976) ist und die Darstellung wesentlich detaillierter auf die Querregelung eingeht, als es für die Interaktionsentwicklung einer manöverbasierten Fahrzeugführung nötig ist. Die erweiterte Kompensationsregelung nach Johannsen (1976) enthält alle Informationen des Modells nach Johannsen *et al.* (1976) und erfüllt darüber hinaus drei weitere Anforderungen zumindest zu einem Teil besser. Für die Entwicklung des Modells für die manöverbasierte Fahrzeugführung wird daher die erweiterte Darstellung nach Johannsen (1976) verwendet.

Das Informationsflussdiagramm nach Kidd & Laughery (1964) stellt eine Möglichkeit der detaillierten Darstellung des Informationsflusses des Fahrers dar. Prinzipiell ist diese Art der Darstellung sehr flexibel und wird für verschiedene Themengebiete eingesetzt, wie beispielsweise dem Annähern an eine Kreuzung nach Kidd & Laughery (1964) oder der Interaktion mit einem ACC oder Tempomaten nach Rühmann & Bubb (2006). In der letztgenannten Quelle ist die allgemeinste Darstellung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion enthalten. Diese wird daher zum Abgleich mit den Anforderungen herangezogen.

Das Informationsflussdiagramm nach Rühmann & Bubb (2006) fokussiert den Fahrer. Selbst in den Darstellungen, die sich direkt auf die Interaktion des Fahrers mit einem Fahrerassistenzsystem beziehen, werden nur die Bedieneingaben dargestellt. Eine gänzliche Interaktion des Fahrers mit dem Fahrzeug und der Umwelt ist daher nicht darstellbar (Anforderung 1 wird nicht erfüllt). Die Bedieneingaben nach Rühmann & Bubb (2006) sind allerdings geeignet, um diskrete Eingaben darzustellen, weshalb sie für die Darstellung von Manövern und Parametereingaben geeignet sind und somit Anforderung 2 erfüllen. Da ein Informationsflussdiagramm aus diskreten Blöcken besteht, ist die Darstellung von

Stabilisierungsaufgaben nur durch das Bilden von Schleifen möglich, die einen Sollwert (z. B. eine gewünschte Geschwindigkeit) laufend mit einem Istwert vergleicht (Anforderung 3 zum Teil erfüllt). Der manöverführende Teil der Fahraufgabe kann prinzipiell durch die diskrete Darstellung im Informationsflussdiagramm ermöglicht werden (Kauer *et al.*, 2010b). Eine Aufteilung in die *Stabilisierungsebene*, *Bahnführungsebene* und *Navigationssebene* kann zumindest zum Teil erreicht werden (Anforderung 5 teilweise erfüllt), indem die Führung als Informationsfluss dargestellt wird und die beiden anderen Ebenen, ohne deren Darstellung zu detaillieren, an das Modell angekoppelt werden (Rühmann & Bubb, 2006). Die Darstellung von *Transitionen* ist mit dem Informationsflussdiagramm ebenso möglich wie die Rückführung des Systemzustandes. Ein fahrerseitiger Manöverkatalog kann über verschiedene Entscheidungsknoten dargestellt werden, was allerdings impliziert, dass der Manöverkatalog fragmentarisch in das Diagramm eingebettet ist (Anforderung 8 teilweise erfüllt). Benutzerschnittstellen sind in Informationsflussdiagrammen nur selten zu finden, können aber zumindest teilweise implementiert werden (vgl. Kauer *et al.*, 2010b). Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung werden mit Informationsflussdiagrammen nicht dargestellt (Anforderungen 10 und 11 werden nicht erfüllt).

	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	AF11
Kompensationsregelung (Johannsen <i>et al.</i> , 1976)											
Zwei-Ebenen Modell (Don- ges, 1978)											
Erweit. Kompensationsre- gelung (Johannsen, 1976)											
Informationsflussmodell (Rühmann & Bubb, 2006)											
Stufenmodell (Welford, 1960)											
Stufenmodell (Wickens & Hollands, 2000)											
SRK-Modell (Rasmussen, 1983)											
Drei-Ebenen Modell (Don- ges, 1982)											

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Fahrzeugführungsmodelle und der Anforderungen an ein Modell für die manöverbasierte Fahrzeugführung

Das Modell nach Welford (1960) erfüllt nur die Anforderung, verschiedene Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung darzustellen. Einige Anforderungen, die in Kapitel 3.1.1 aufgestellt wurden, spielten 1960 noch keine Rolle, wie automatisierte technische Systeme. Das Modell ist außerdem der Begründer der Stufenmodelle, somit also auf einer noch einfacheren Ebene anzusiedeln, und ist nicht speziell für die Fahrzeugführung entwickelt worden. Eine deutliche Weiterentwicklung stellt das Stufenmodell nach Wickens & Hollands (2000) dar, das neben der Anforderung nach der Darstellung verschiedener Stufen der menschlichen Informationsverarbeitung ebenfalls eine Rückführung des Systemzustandes enthält und somit Anforderungen 7 und 10 vollständig erfüllt.

Aufgrund des Signalflusses von der letzten Stufe des menschlichen Informationsverarbeitung der Handlungsausführung (Response Execution) zum Umfeld (System Environment) ist Anforderung 1 zum Teil erfüllt. Es fehlt jedoch ein Systemelement, das die Mensch-Maschine-Schnittstelle abbildet, was implizit aber über den Systemblock *System Environment* abbildbar ist (Anforderung 9 zum Teil erfüllt).

Das Modell besitzt Eigenschaften, die eine Aufteilung in verschieden starke Stufen der Kognition beinhalten (Anforderung 11 erfüllt). Der Verbindungspfeil, der direkt von der Wahrnehmung (Perception) zur Handlungsauswahl (Response Selection) verläuft, ohne einen kognitiven Anteil zu besitzen, weist auf informatorische Aufgaben hin, die ohne Arbeitsgedächtnis ablaufen (vgl. Abb. 11) und somit Anforderung 5 nach einer getrennten Darstellung von *Stabilisierungsebene* und *Bahnführungsebene* zumindest zum Teil erfüllen kann, auch wenn diese nicht explizit angegeben sind.

Die verschieden intensiven Stufen der Kognition werden in der Ergonomie oft mit dem Modell von Rasmussen (1983) beschrieben. Durch die Aufteilung in fertigkeitsbasiertes, regelbasiertes und wissensbasiertes Verhalten ist es für die Darstellung der verschiedenen Kognitionsstufen und damit auch für die verschiedenen komplexen Entscheidungsvorgänge beim Führen eines Fahrzeugs geeignet (Donges, 1996). Das Modell ist allerdings nicht für die Fahrzeugführung entworfen worden, und erst Donges (1996) stellte einen konkreten Zusammenhang zwischen dem SKR-Modell und der Fahrzeugführung her. Außer Anforderung 11 ist noch Anforderung 3 und 5 erfüllt.

Das Drei-Ebenen-Modell nach Donges (1982) mit der Aufteilung der Fahrzeugführungsaufgaben in Stabilisierung, Bahnführung und Navigation ist für die Fahrzeugführung entwickelt worden und erfüllt daher auch die meisten aufgestellten Anforderungen. Es unterscheidet in die Systemelemente Fahrer, Fahrzeug und Umwelt (Anforderung 1), es zeigt eine zwar vereinfachte Darstellung der Stabilisierungsaufgabe (Anforderung 3), es unterteilt in die Bereiche Stabilisierung und Bahnführung (Anforderung 5) und besitzt eine Rückführung des Systemzustandes (Anforderung 7). Bezieht man die Erweiterung von Winner *et al.* (2006) in die Modellvorstellung mit ein (vgl. Kapitel 2.2.2), ist ebenfalls eine Darstellung von Mensch-Maschine-Schnittstellen und einer Manöverbeauftragung möglich (Anforderung 4 und 9).

3.1.3 Modell der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei der Nutzung des manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes

Die Gegenüberstellung der Anforderungen mit den Modellen zeigt, dass jede Anforderung (abgesehen von Anforderung 8) durch eines der Modelle abgedeckt werden kann. Es ist aber auch ersichtlich, dass ein neues Modell erstellt werden muss, in dem zwar Elemente und konzeptionelle Ideen der aufgeführten Modelle verwendet werden können, es aber einer neuen Struktur bedarf. Als Grundstruktur wird das Modell von Wickens & Hollands (2000) gewählt, da es durch seinen generischen Aufbau leicht anzupassen ist und es auf die Informationsverarbeitung fokussiert, die für die manöverbasierte Fahrzeugführung eine bedeutsame Rolle spielt. Nur wenn es möglich ist, eine Interaktion aufzubauen, in der ein Fahrer ohne großen Anteil des Arbeitsgedächtnisses das Fahrzeug durch den Verkehr führen kann, wird eine manöverbasierte Fahrerassistenz ein zielführendes Konzept sein. Da für die manöverbasierte Fahrzeugführung ebenfalls das Wechselspiel zwischen stabilisierenden Eingaben, die beim Fahrer weitestgehend fertigkeitsbasiert ablaufen, und Manövereingaben eine bedeutende Rolle spielt, wird für die Stabilisierung der Kompensationsregler nach Johannsen (1976) aufgegriffen.

Die Manöver- und Parameterinteraktion ist diskret und kann daher nicht kontinuierlich (wie beispielsweise durch den Kompensationsregler nach Johannsen, 1976) dargestellt werden. Der Entscheidungsprozess wird daher aus einer Kombination des Stufenmodells der Informationsverarbeitung nach Wickens & Hollands (2000) und des SRK-Modells nach Rasmussen (1983) dargestellt (ein Ansatz, diese beiden Modell miteinander zu verbinden, ist bei Abendroth, 2001 zu finden). Bei der Aufteilung in die Elemente *Fahrer*, *Fahrzeug* und *Umfeld* wurde sich am Modell nach Donges (1982) orientiert, welches um die Mensch-Maschine-Schnittstelle erweitert wurde, da dieser eine wichtige Rolle bei der Entwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung zukommt. Im Folgenden wird das Modell detailliert erklärt.

Abb. 13 zeigt den Signalfuss bei manöverbasierter und konventioneller Fahrzeugführung (die konventionelle Fahrzeugführung ist in Abb. 13 ausgegraut). Ausgehend von einer Transportmission (oberhalb des Systemelements *Kognition/Arbeitsgedächtnis*) plant der Fahrer eine Route im Arbeitsgedächtnis und wählt diese im nächsten Schritt der Informationsverarbeitung der *Handlungsauswahl* nach Wickens & Hollands (2000) aus. Dies geschieht bei unbekannten oder nur teilweise bekannten Strecken auf wissenbasierter Ebene. Bei bekannten Strecken kann die Auswahl auch auf regelbasierter Ebene erfolgen, was hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt ist. Ist die Route oder ein Teil der Route festgelegt, erfolgt auf Basis der wahrgenommenen Informationen, z. B. über andere Verkehrsteilnehmer oder Schilder, eine Assoziation von Schemata, die zur Situationslösung (oder Situationsbewältigung) erlernt und bekannt sind, mit den wahrgenommenen Informationen. Dies erfolgt wieder im Systemelement *Kognition* und zeigt damit, dass, wenn der Fahrer eine Navigationaufgabe (er fährt auf einer unbekannten Strecke) bewältigen muss, er mehr Zeit benötigt.

Ist die assoziative Zuordnung erfolgt, wählt der Fahrer eine Trajektorie aus. Dabei handelt es sich in der Regel um eine regel- oder fertigkeitsbasierte Aufgabe, was durch das räumliche Ausmaß des Blockes *Auswahl Trajektorie* dargestellt ist, der sich über die regelbasierte und fertigkeitsbasierte Ebene erstreckt. Bei konventioneller Fahrzeugführung werden diese Größen als Sollgrößen in den Regler eingebracht (unterer ausgegrauter Regelkreis in Abb. 13).

Im Fall der Manöverführung erfolgt nach der Auswahl der Soll-Trajektorie eine Auswahl eines Manövers, das durch einen Abgleich mit einem im Langzeitgedächtnis vorhandenen Repertoire an abgeschlossenen Handlungseinheiten unterstützt wird. In den nächsten Abschnitten wird gezeigt, dass hier eine zentrale Forschungsfrage für eine Manöverführung aufgeworfen werden muss. Nur wenn ein Manöverkatalog in der Mensch-Maschine-Interaktion angeboten wird, der sich mit diesen abgeschlossenen Handlungseinheiten deckt, wird der Fahrer eine schnelle und für ihn prädzierbare Auswahl treffen können.

Die Manöverauswahl verlässt somit über die Betätigung einer Schaltfläche das Hauptsystemelement *Fahrer* und wird über die Mensch-Maschine-Schnittstelle, die im manöverbasierten Fall die Manöverschnittstelle darstellt, dem Fahrzeug übermittelt. Dort wird der explizite Manöverwunsch vom System registriert und in Steuerbefehle umgesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass min. zwei Arten von Manövern existieren. Der eben beschriebene Fall bezieht sich auf ein explizites Manöver, das vom Fahrer bewusst gegeben wird. Ist ein explizites Manöver abgeschlossen, stellt sich allerdings die Frage, was im Anschluss folgt. Hier werden vom System automatische implizite Manöver aufgerufen, die als Default, den das Fahrzeug nach dem Abschluss eines expliziten Manövers annimmt, angesehen werden können. Beispielsweise erfolgt auf ein explizites Manöver

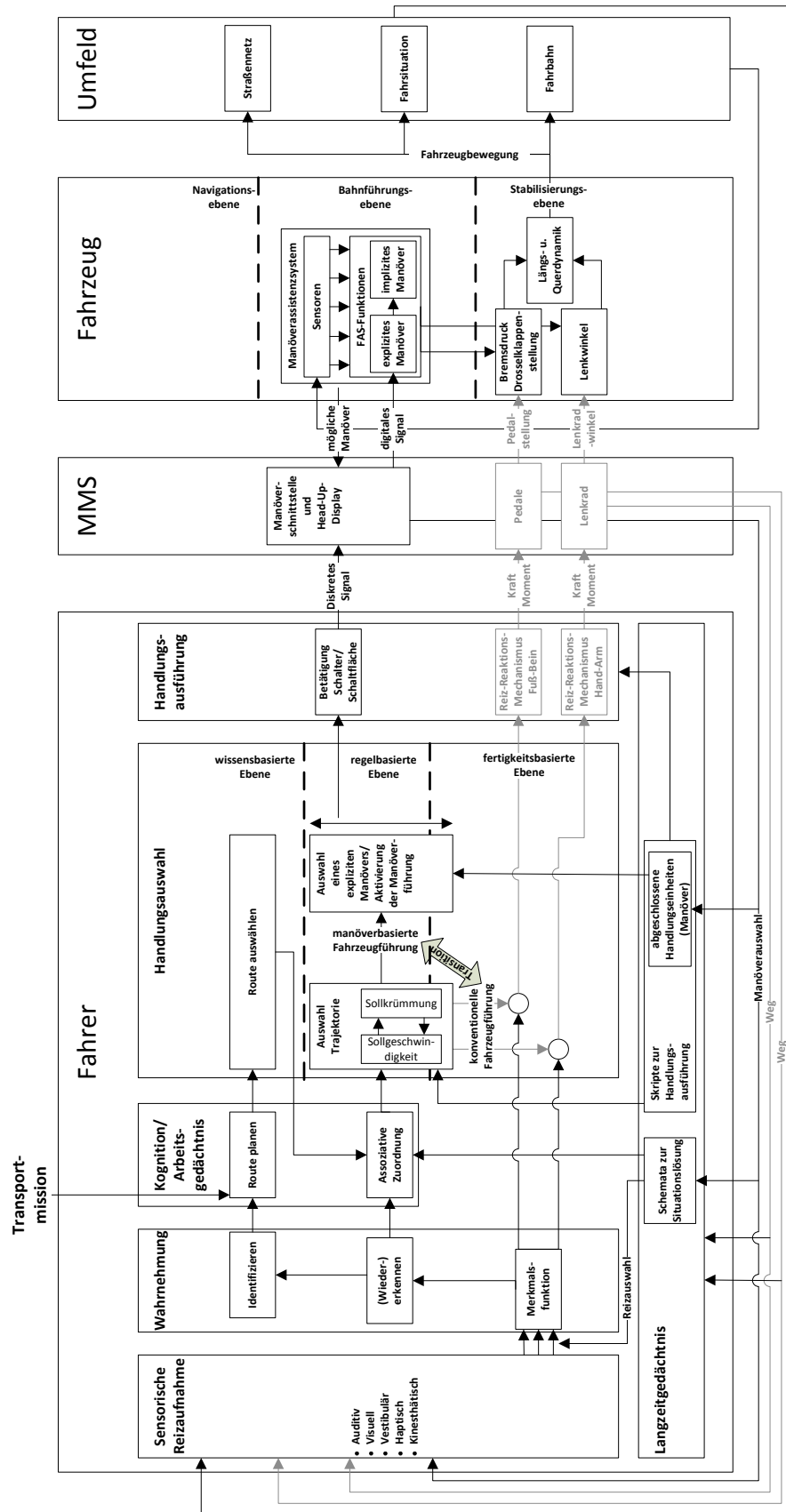


Abbildung 13: Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung

„Fahrstreifenwechsel“ das automatisch vom System aktivierte implizite Manöver „Straße folgen“. Neben dem Manöverkatalog wird in Kapitel 3.2 ebenfalls dieses Konzept der expliziten und impliziten Fahrmanöver in einer Probandenstudie überprüft. Dies wird in Kapitel 3.2.3 näher erläutert und ist durch die beiden Elemente „explizites Manöver“, das eine direkte Verknüpfung mit der Manöverschnittstelle besitzt, und „implizites Manöver“, welches auf ein explizites Manöver folgt (im Systemelement *Manöverassistenzsystem*), dargestellt. Das Manöverassistenzsystem regelt den Bremsdruck und den Lenkradwinkel basierend auf den Informationen des Umfeldes. Die Handlungen des Systems wirken auf das Umfeld, die Veränderungen dort können wiederum von den Sensoren des Systems und dem Fahrer wahrgenommen werden. Die Wahrnehmung beim Fahrer erfolgt über die sensorische Reizaufnahme. Nach Rasmussen (1983) werden diese Signale über Merkmalsfunktionen entweder direkt zu einer Handlungsauswahl geführt, was der fertigkeitsbasierten Ebene entspricht und beispielsweise das Stabilisieren im Fahrstreifen auf einer Autobahn darstellt, oder über das Element des Wiedererkennens der assoziativen Zuordnung bereitgestellt.

3.2 Diskretisierung einer Autobahnfahrt in Manöver aus Sicht des Fahrers

Eine Fahrzeugführung nach dem *Conduct-by-Wire*-Prinzip erfolgt auf Bahnführungssebene (Winner *et al.*, 2006). Die *Bahnführungsebene* ist im regelungstechnischen Sinn die Sollwertvorgabe, die zwar häufig angepasst, aber über Zeitabschnitte konstant bleibt, wie beispielsweise bei einer Folgefahrt auf einer Autobahn.

Für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion eines manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes werden daher diskrete Abschnitte benötigt, die sequentiell aneinander gesetzt den Fahrmissionsabschnitt mit aktiver Manöverführung abbilden und die für den Fahrer verständlich und nachvollziehbar gestaltet sein müssen. Diese für den Fahrer nachvollziehbaren Abschnitte werden als *Handlungseinheit* (HE) definiert. Die Handlungseinheiten sind nicht mit Abschnitten konstanter Sollwertvorgaben, den Bahnführungseinheiten (BE), gleichzusetzen, da der Fahrer nicht alle Bahnführungsentscheidungen selber treffen wird. Bei einer Fahrzeugführung mit Fahrerassistenzsystemen wird ein Teil der Bahnführung bereits heute von technischen Systemen übernommen. Ein ACC wählt bei einer Folgefahrt, in der das vorausfahrende Fahrzeug verzögert, selbständig die Geschwindigkeit. Dies stellt in diesem Fall den *Bereich sicherer Führungsgrößen* nach Donges (1982) dar und ist somit Teil der *Bahnführungsebene*. Die Handlungseinheiten bestehen daher aus einer oder mehreren Bahnführungsentscheidungen. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 14 dargestellt. In dieser Arbeit wird die manöverbasierte Fahrzeugführung für den Nutzungskontext der Autobahn entwickelt, da zum einen zu erwarten ist, dass eine Umsetzung in einem Versuchsträger aus technischer Sicht hier am wahrscheinlichsten ist (z. B. im Vergleich zu innerstädtischen Fahrmissionen). Zum anderen ist die Gestaltung und prototypische Umsetzung für die Autobahn einfacher als für die Stadt. Es wird daher in dieser Arbeit überprüft, ob die manöverbasierte Fahrzeugführung für die Autobahn möglich ist. In folgenden Arbeiten und Projekten, vorausgesetzt eine Interaktion gelingt für die Autobahn, kann der Nutzungsbereich erweitert werden. Lässt sich die manöverbasierte Fahrzeugführung in städtischer Umgebung nicht realisieren, kann dieses Fahrzeugführungskonzept immer noch für den Nutzungskontext der Autobahn verwendet werden. Der Begriff *Fahrmission* bezieht sich in dieser Arbeit daher nur auf die Autobahn.

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Handlungseinheiten der manöverbasierten Fahrzeugführung für den Nutzungskontext der Autobahn ermittelt wurden. Ausgehend

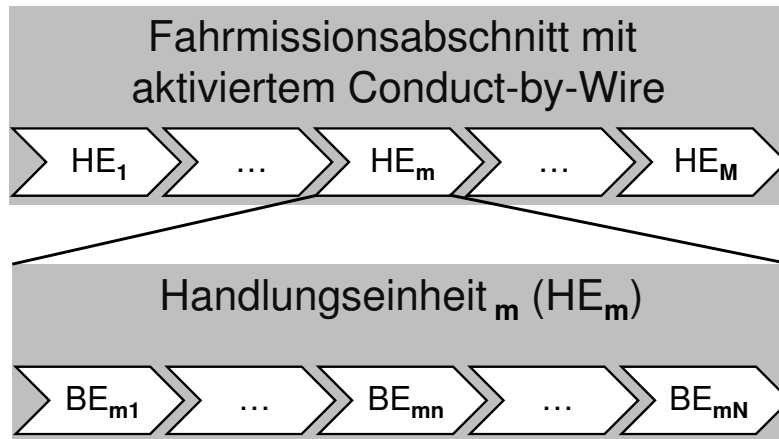


Abbildung 14: Die Fahrmission aufgeteilt in einzelne Handlungseinheiten (HE), die wiederum in einzelne Bahnführungsentscheidungen (BE) aufgeteilt sind

von Diskretisierungsansätzen von Fahrmissionen aus der Literatur in Kapitel 3.2.1 und deren Diskussion wird eine eigene Versuchsmethodik vorgestellt (vgl. Kapitel 3.2.2), um die einzelnen Handlungseinheiten zu identifizieren. Ausgehend von dieser Methodik werden in Kapitel 3.2.2 die Ergebnisse und deren Diskussion dargestellt. Im Anschluss werden die Ergebnisse in Hinblick auf einen Manöverkatalog für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion diskutiert sowie ein aus den Ergebnissen abgeleitetes Konzept der manöverbasierten Fahrzeugführung (vgl. Kapitel 3.2.3) vorgestellt.

3.2.1 Diskretisierungsansätze zur Einteilung von Fahrmissionen

Ein häufig verwendeter Ansatz, um Fahrmissionen in diskrete Abschnitte zu unterteilen, ist die Verkehrssituation. Die *Bundesanstalt für Straßenwesen* hat Anfang der 1980er Jahre ausführliche Forschung in diesem Bereich betrieben. In Studien von Benda *et al.* (1983) und Benda (1985) sind in aufwendigen Versuchen Verkehrssituationen aus Sicht des Fahrers definiert worden. Der dort verwendete Ansatz sowie die erzielten Ergebnisse wurden von Fastenmeier (1995) weiterentwickelt und vereinfacht.

Ein weiterer Ansatz der Diskretisierung von Fahrmissionen ist die Unterteilung in Fahrmanöver. Wesentliche Beiträge lieferten hierzu Nagel & Enkelmann (1991), Tölle (1996) und Bajcsy & Nagel (1996). Im Gegensatz zu Benda *et al.* (1983), sind die Manöver allerdings nicht aus Sicht des Fahrers abgeleitet worden, sondern sind Elemente der Fahrmissionsbewältigung von autonomen Fahrzeugen.

Verkehrssituation Nach Benda *et al.* (1983) wird die Umgebung des Mensch-Maschine-Systems aus Fahrersicht als Verkehrssituation bezeichnet. Des Weiteren wird postuliert, dass sich das Autofahren als eine Kette von Interaktionen zwischen dem System Fahrer-Fahrzeug und seiner sich kontinuierlich ändernden Umgebung abbilden lässt.

Die Klassifikation der Verkehrssituationen von Benda *et al.* (1983) fand anhand von Probandenversuchen im Labor statt. Aus einer Stichprobe von 400 fotografierten Verkehrssituationen wurden zufällig Paare von Fotos gezogen und den Versuchspersonen vorgelegt. Diese mussten die beiden Bilder hinsichtlich der Übereinstimmungen und der

Unterschiede beurteilen. Insgesamt wurden so 15 Merkmale gefunden, die Verkehrssituationen aus Sicht des Fahrers unterscheiden:

- Verkehrsweg
- besondere Sichtbehinderungen
- Straßenzustand, Fahrbahn
- Kreuzungen mit Straßen
- Kreuzungen mit Bahn
- Vorfahrtregelung
- Sichtbedingungen
- Wetterbedingungen
- Wegverlauf in der Horizontalebene: Kurvigkeit
- Wegverlauf in der Vertikalebene: Steigung, Gefälle
- Verkehrsdichte
- Engstellen, Hindernisse
- Fahrfehler oder Verhaltensfehler anderer Verkehrsteilnehmer
- Verkehrsschilder

Aufbauend auf dieser Merkmalsliste wurde ein Klassifikationsschema aufgebaut. Der Klassifikationsansatz nach Benda *et al.* (1983) ist in Abb. 15 zu finden.

Die Variablen der Hauptkategorie *Straßentyp und Straßenausbau* schließen sich gegenseitig aus. Eine Straße kann nicht gleichzeitig eine Autobahn und eine innerstädtische Straße sein. Die restlichen Variablen lassen sich theoretisch alle miteinander kombinieren, aber auch dort gibt es Kombinationen, die in der Realität nicht vorkommen können, wie beispielsweise eine Kombination von Knotenpunkten (z. B. Knotenpunkt Ziffer 3: *Kreuzung usw.; Regelung rechts vor links* Benda, 1985, S. VI) auf einer Autobahn. Insgesamt werden so über 28 Millionen verschiedene Verkehrssituationen unterschieden (Benda *et al.*, 1983). Betrachtet man nur das Autobahnumfeld, sind es 3,1 Millionen Situationen (Benda *et al.*, 1983).

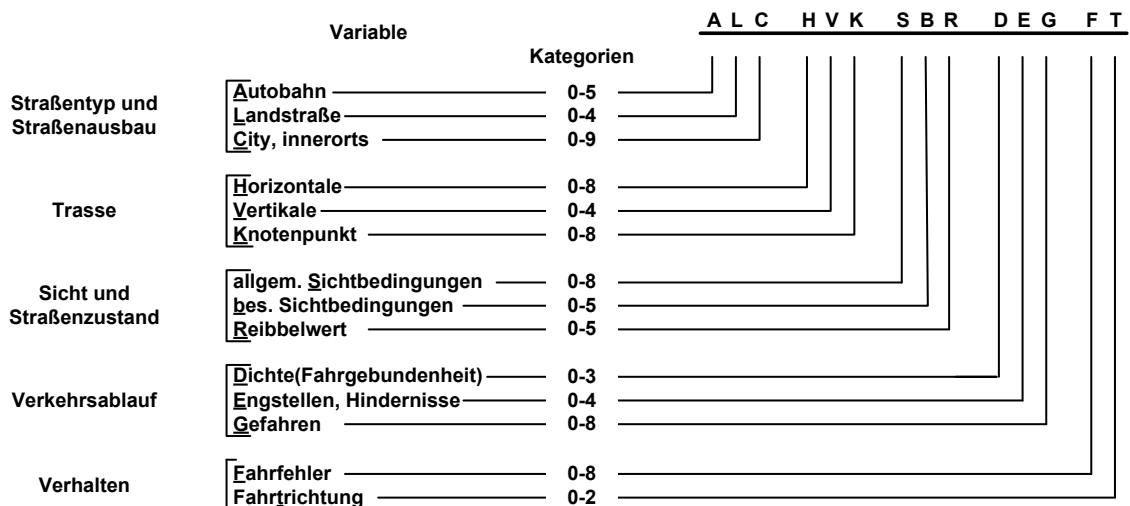


Abbildung 15: Klassifikationsschema für Verkehrssituationen nach Benda *et al.* (1983)

Die große Anzahl an Verkehrssituationen ist für die meisten Forschungsgebiete nicht anwendbar (Fastenmeier, 1995). Daher wurde das Klassifikationsschema von Fastenmeier (1995) überarbeitet und im Umfang deutlich reduziert. Diese vereinfachte Version ist in

Abb. 16 dargestellt und liefert für die Autobahn, nach einer Eliminierung von unmöglichen Kombinationen (z. B. ampelgeregelte Kreuzung auf der Autobahn) für

1. die Straßengestaltung nach baulichen Merkmalen fünf (z. B. Anzahl an Fahrstreifen, Ausgestaltung des Seitenstreifens, etc.; für eine nähere Beschreibung siehe Fastenmeier, 1995 S. 49),
2. den Horizontalverlauf zwei ($H_0 = \text{ohne Kurve}$, $H_1 = \text{Kurve}$),
3. den Vertikalverlauf zwei ($V_0 = \text{ebener Verlauf}$, $V_1 = \text{Steigung/Gefälle}$),
4. den Knotenpunkten zwei ($K_0 = \text{ohne Kreuzung}$, $K_3 = \text{Ein- /Ausfahrt auf BAB}$),
5. den Engstellen zwei ($E_0 = \text{ohne Engstellen/Hindernis}$, $E_1 = \text{Engstellen, Hinder- nisse, etc.}$) und
6. der Fahrtrichtung zwei ($F_0 = \text{ohne Fahrtrichtungsänderung}$, $F_1 = \text{von der Autobahn abfahren}$)

Unterscheidungsmöglichkeiten. Werden diese kombiniert, ergeben sich 160 Autobahnsituationen.

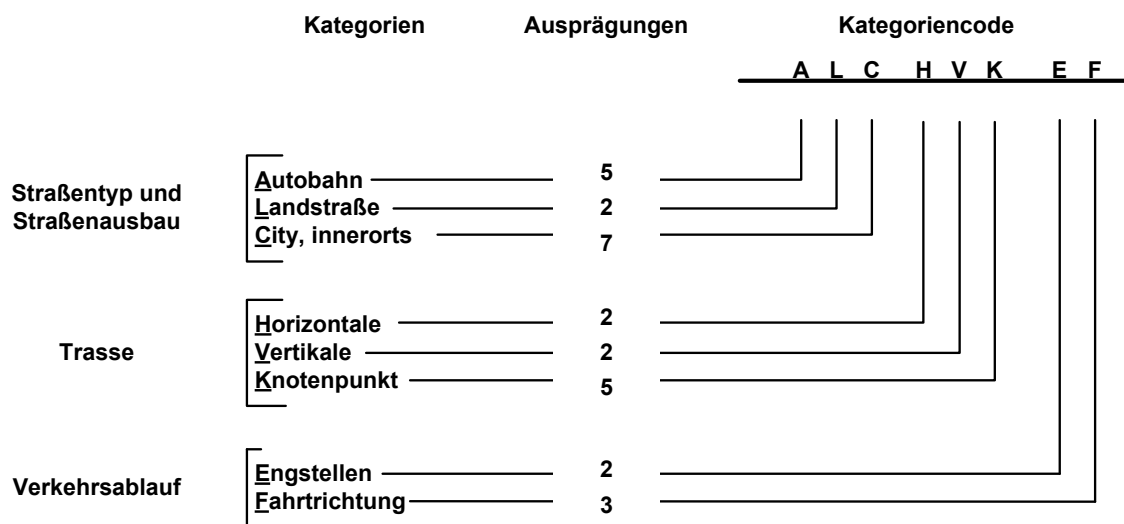


Abbildung 16: Vereinfachtes Klassifikationsschema von Fastenmeier (1995) aufbauend auf dem Klassifikationsschema von Benda *et al.* (1983)

Fahrmanöver Ein anderer Ansatz zur Diskretisierung von Fahrmissionen wurde, wie oben erwähnt, von Nagel & Enkelmann (1991) vorgestellt. Mit Hilfe von 17 Fahrmanövern soll es einem automatischen Kopiloten möglich sein, Fahrmissionen zu assistieren oder zu absolvieren. Die Liste der Fahrmanöver, der Vollständigkeit halber von Bajcsy & Nagel (1996) um das Manöver „Stillstand“ erweitert, ist in Tab. 5 zusammengefasst (die Übersetzung der in englisch publizierten Manöver nach Nagel & Enkelmann, 1991 erfolgt nach Tölle, 1996).

Die Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991) sind generisch, was in diesem Fall bedeutet, dass die Ausführung nicht a priori festgelegt ist, sondern über Parametereinstellung weiter verändert werden kann (Nagel & Enkelmann, 1991). Aus diesem Grund sind die Manöver nicht exakt beschrieben oder definiert. Die Mehrzahl dieser Fahrmanöver waren bereits Mitte der 90er Jahre in verschiedenen Versuchsträgern realisiert (Nagel &

- | | |
|--|---|
| 1. Anfahren | 11. Überholen |
| 2. Straßenzug folgen | 12. vor einem Gegenstand anhalten |
| 3. eine Kreuzung überqueren | 13. links/rechts an einem Gegenstand vorbeifahren |
| 4. Fahrspurwechsel nach links/rechts | 14. hinter einem anfahrenden Fahrzeug anfahren |
| 5. links/rechts abbiegen | 15. einem Fahrzeug folgen |
| 6. am rechten Straßenrand anhalten | 16. in eine Parklücke einfahren |
| 7. rückwärts fahren | 17. aus einer Parklücke herausfahren |
| 8. Kehre links/rechts | 18. Stillstand |
| 9. Fahrtrichtung umkehren | |
| 10. Annähern an einen sich vor dem Fahrzeug befindenden Gegenstand | |

Tabelle 5: Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991), erweitert um das Manöver „Stillstand“ nach Bajcsy & Nagel (1996)

Arens, 2005). Die Manöver sind nicht vollständig voneinander unabhängig, da ein Manöver „Kehre“ (U-Turn) auch aus zwei 90°-Abbiegungen in die gleiche Richtung bestehen könnte (Nagel & Enkelmann, 1991).

Da sich diese Arbeit auf das Autobahnumfeld konzentriert, sind die Manöver „Kreuzung überqueren“, „links/rechts Abbiegen“, „Kehren links/rechts“, „Fahrtrichtung umkehren“ sowie die Parkmanöver irrelevant.

Die 17 Fahrmanöver nach Nagel & Enkelmann (1991) sind von Tölle (1996) auf eine Anzahl von 9 reduziert worden. Ausgangspunkt ist eine Klassifikation der Manöver in die Manövergruppen M1: „Fahrmanöver ohne Berücksichtigung von Verkehrsobjekten“, M2: „Fahrmanöver mit Berücksichtigung von Verkehrsobjekten“ und M3: „Parkmanöver“. Durch die Einführung eines „virtuellen Verkehrsobjektes“, das im Falle eines Manövers aus der Manövergruppe M1 zwischen dem Egofahrzeug und dem virtuellen Verkehrsobjekt immer den einzuhaltenden Sicherheitsabstand einhält, können einige der Fahrmanöver als Spezialfälle anderer Manöver angenommen werden. Das Manöver „hinter einem anfahrenden Fahrzeug anfahren“ ist somit nur ein Spezialfall des Manövers „Anfahren“. Die auf 9 Manöver reduzierte Liste ist in Tab. 6 dargestellt.

- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1. Anfahren | 6. Fahrspurwechsel |
| 2. Folgen | 7. Abbiegen |
| 3. Annähern | 8. Umkehren |
| 4. Passieren | 9. Parken |
| 5. Kreuzung überqueren | |

Tabelle 6: Manöver nach Tölle (1996)

Wie schon im vorhergehenden Absatz erwähnt wurde, sind einige der Manöver für diese Arbeit irrelevant, da sie auf einer Autobahn nicht vorkommen. Bei den Manövern nach Tölle (1996) sind dies die Manöver „Kreuzung überqueren“, „Umkehren“ und „Parken“.

Beschreibung von Trajektorien durch Bewegungsverb Eine dem Manöveransatz ähnlicher Ansatz zur Beschreibung von Autofahrten ist die abschnittsweise Beschreibung über Bewegungsverb. In einem Ansatz von Heinze *et al.* (1991) werden aus Aufnahmen einer statischen Videokamera, die auf den Platz des Durlacher Tors (Karlsruhe) gerichtet ist, Trajektorienverläufe von Fahrzeugen extrahiert und über eine rechnerinterne Repräsentation einem Bewegungsverb zugeordnet. Die etwa 90 verwendeten Bewegungsverb sind aus einer systematischen Analyse von 9000 Verben, die einem Wörterbuch der deutschen Sprache entnommen wurden, entstanden. Zu den ca. 90 Verben gehören beispielsweise die Verben *abbiegen*, *sich anschließen*, *schneiden* oder *schleudern* (Heinze *et al.*, 1991).

Diskussion der Diskretisierungsansätze im Hinblick auf eine manöverbasierte Fahrzeugführung Der Ansatz der Einteilung einer Fahrmission oder eines Teils einer Fahrmission in Verkehrssituationen nach Benda *et al.* (1983) ist deskriptiv. Die Klassifikation der Verkehrssituationen kann für eine Einteilung a posteriori einer durch eine Versuchsperson absolvierten Versuchsstrecke dienen. Durch diese beschreibende Art ist die Verkehrssituation als Beauftragungskatalog für eine manöverbasierte Fahrzeugführung nicht möglich. Des Weiteren ist die Auswahlmöglichkeit von über 3 Millionen Verkehrssituationen für den Fahrer nicht zu überblicken. Selbst 160 Verkehrssituationen für Autobahnen nach Fastenmeier (1995) sind eher kritisch zu sehen. Durch den deskriptiven Charakter ist für eine Fahrer-Fahrzeug-Interaktion auch die von einem technischen System auszuführende Aufgabe inhaltlich nicht beschrieben.

Der Ansatz der Beschreibung von Trajektorien anhand von Bewegungsverb bietet für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion den Vorteil, dass natürlichsprachliche Begriffe verwendet wurden, die somit den Versuchspersonen verständlich sind, sofern sie die deutsche Sprache beherrschen. Viele der Begriffe sind allerdings durch ihren beschreibenden Charakter nicht für eine Beauftragung von Bahnführungskommandos geeignet.

Die Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991), erweitert durch Bajcsy & Nagel (1996), bieten für eine manöverbasierte Fahrzeugführung die besten Voraussetzungen. Mit den Manövern ist eine Fahrmission vollständig beschreibbar. Die Manöver eignen sich nicht nur zur deskriptiven Beschreibung von Fahrabschnitten, sondern sind nach Bajcsy & Nagel (1996) auch für eine Beauftragung geeignet, da diese ebenfalls präskriptiven Charakter besitzen. Die Vereinfachung nach Tölle (1996) ist für eine fahrerzentrierte Diskretisierung von Fahrmissionen oder Fahrmissionsabschnitten ebenfalls interessant, da er die Manöver „Straßenzug folgen“ und „einem Fahrzeug folgen“ zu einem Manöver zusammenfasst. Diese Aggregation ist in einem ACC-System für die Längsführung schon vollzogen und vom Nutzer akzeptiert und verstanden. Dennoch ist für beide Ansätze nicht nachgewiesen, dass ein Fahrer einen Fahrmissionsabschnitt in dieser Art einteilen würde.

Der Ansatz nach Nagel & Enkelmann (1991), erweitert durch Bajcsy & Nagel (1996), wird im Folgenden in einem Laborexperiment überprüft.

3.2.2 Versuchsreihe: Entscheidungspunktanalyse

Die aus der Literatur dokumentierten Ansätze zur Diskretisierung der Fahrmission liefern eine gute Grundlage. Dem vielversprechendsten Ansatz nach Nagel & Enkelmann (1991), erweitert durch Bajcsy & Nagel (1996), fehlt jedoch die fahrerzentrierte Sichtweise. Aus diesem Grund wurden Versuche konzipiert, um auf experimentellem Wege die Struktur, wie Fahrer Fahrmissionen einteilen, besser verstehen zu können. Ein Ziel ist dabei, herauszufinden, ob sich der Manöverkatalog nach Nagel & Enkelmann (1991), erweitert durch Bajcsy & Nagel (1996), in einer Einteilung durch Versuchspersonen wiederfindet. Ein weiteres Ziel ist die Identifizierung von Manövern, die über den Katalog von Nagel & Enkelmann (1991), erweitert durch Bajcsy & Nagel (1996), hinausgehen. Es ist denkbar, dass der Fahrer eine Fahrmission granularer oder aggregierter einteilt, als es die Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991), erweitert durch Bajcsy & Nagel (1996), tun. Für die systematische Diskretisierung von Autobahnfahrten durch den Fahrer wird ein Laborexperiment – die Entscheidungspunktanalyse – vorgeschlagen (Schreiber *et al.*, 2009, 2010b).

Versuchskonzept und Versuchsdurchführung Die Entscheidungspunktanalyse ist ein entwickeltes Versuchskonzept, das die gedanklichen Strukturen des Fahrers auf *Bahnführungsebene* (und damit auch für eine Manöversteuerung) beim Absolvieren einer Fahrmission offenlegen soll. Der Proband wird nach einer kurzen Einführung in die manöverbasierte Fahrzeugführung gebeten, Videos aus Fahrerperspektive zu betrachten. Der Proband wird weiter aufgefordert, eine Taste zu drücken, wenn er der Meinung ist, dass er als Fahrer dem Fahrzeug einen Befehl erteilen müsste, damit es die im Video zu sehende Handlung ausführt. Zu jeder Betätigung der Taste durch die Versuchspersonen wurde der Zeitpunkt aufgezeichnet. Insgesamt wurden fünf Videos gezeigt. Dabei handelt es sich um drei Stadtvideos, die eine Länge von jeweils 6–8 Minuten haben, ein Landstraßenvideo mit einer Länge von 3 Minuten sowie ein Autobahnvideo mit der Länge von 10 Minuten. Im Weiteren wird nur der Teil des Versuchs betrachtet, in dem das Autobahnvideo verwendet wurde. Lediglich für die Fahrsituation des vollständigen Verzögerns in den Stillstand und das Wiederanfahren, die auf den Autobahnvideos nicht dargestellt werden konnten, werden die Stadtszenarios herangezogen.

Die Versuche erheben nicht den Anspruch der vollständigen Abbildung aller Autobahnverkehrssituationen. Wollte man diese Vollständigkeit im Hinblick auf alle Situationen, die während einer Fahrt auftreten können, herstellen, könnte man beispielsweise die Verkehrssituationen nach Benda *et al.* (1983) zugrunde legen, was versuchsmethodisch kaum bewältigbar ist. Es soll daher versucht werden, einen möglichst repräsentativen Abschnitt einer Autobahnfahrt abzubilden. Um dies zu gewährleisten, wird die reduzierte Systematisierung von Verkehrssituationen für Autobahnen von Fastenmeier (1995) für die Auswahl des Versuchsszenarios einbezogen. Übrig bleiben theoretisch 160 Situationen. Es können aber noch weitere Vereinfachungen getroffen werden. Die Variable A, die verschiedene bauliche Merkmale von Autobahnen unterscheidet, wurde daher nicht berücksichtigt, da diese Merkmale die Dauer der Videopräsentation deutlich verlängert hätten und kein Einfluss auf die Diskretisierung ersichtlich ist. Es wurden weiterhin nicht alle Kombinationen der Ausprägung der Variablen (H, V, K, E, F; vgl. Abb. 16) berücksichtigt. Im ausgewählten Video ist jedoch jede Variabel einmal variiert worden. Die für das Autobahnvideo ausgewählte Strecke ist in Abb. 17 zu finden. Entlang der Strecke sind nach der Nomenklatur von Fastenmeier (1995) die vorkommenden Fahrsituationen aufgetragen.

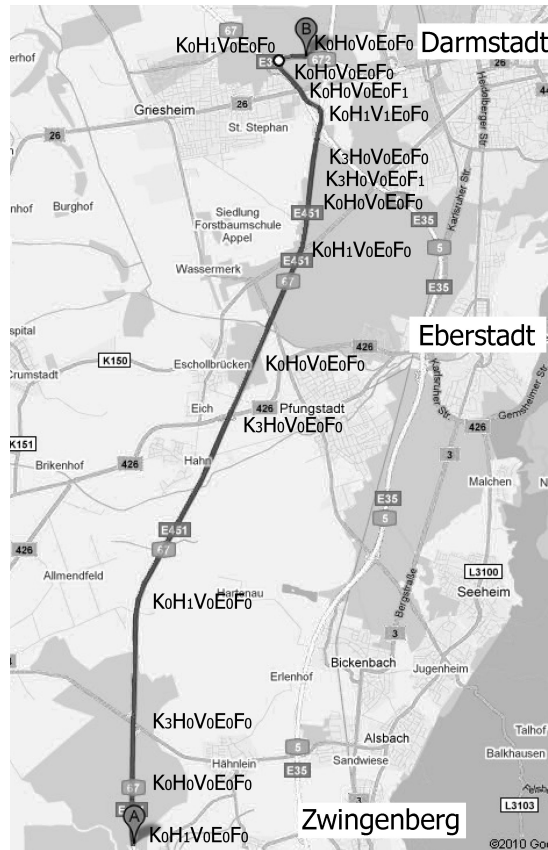


Abbildung 17: Strecke des Autobahnvideos von Punkt A nach Punkt B; entlang der Strecke sind die Verkehrssituationen aufgetragen; K_0 = ohne Kreuzung, K_3 = Ein-/Ausfahrt auf BAB, H_0 = ohne Kurve, H_1 = Kurve V_0 = ebener Verlauf, V_1 = Steigung/Gefälle, E_0 = ohne Engstellen/Hindernis, E_1 = Fahrbahnverengung, F_0 = ohne Fahrrihtungsänderung, F_1 = von der Autobahn abfahren

Der Versuchsaufbau umfasst einen Beamer für die Projektion der ausgewählten Fahr-szenarios, der an ein Notebook angeschlossen ist. Das Notebook verfügt über die Soft-ware *INTERACT*, die für die Auswertung von Blickbewegungsvideos verwendet werden kann. Während des Abspielens lassen sich mittels Knopfdruck bestimmte Zeitpunkte oder Zeiträume entsprechend kennzeichnen und im Anschluss in Form einer Zeitleiste anzei-gen. Außerdem kann der Versuchsleiter schnell zu den einzelnen Markierungen springen und diese retrospektiv mit dem Probanden diskutieren. Über einen Rechner wurden mit-tels des Programms *INTERACT* die Entscheidungspunkte der Probanden erfasst. In der Entscheidungspunktanalyse ist lediglich einer Taste die Bedeutung „neue Handlungsein-heit“ zugeordnet worden, die von den Versuchspersonen während der Versuche betätigt wurde. Es kann nun mit dem Programm ein Video geladen werden. Während des Ab-spielens lassen sich so mittels Knopfdruck bestimmte Zeitpunkte oder Zeiträume entspre-chend kennzeichnen und im Anschluss in Form einer Zeitleiste anzeigen.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurde den Probanden eine schriftliche Einleitung vorgelegt. Sie wurden gebeten, diese sorgfältig durchzulesen. Durch die Verwendung ei-ner schriftlichen Einleitung sollte, im Gegensatz zu einer mündlichen Einleitung, gewähr-leistet sein, dass alle Probanden die gleiche Einweisung mit gleichen Informationen und

identischem Wortlaut erhalten. In der Einleitung wurde ihnen allgemein die Idee erläutert, welche hinter der manöverbasierten Fahrzeugführung steht. Sie wurden gebeten, sich vorzustellen, dass sie in den zu sehenden Videos in einem Fahrzeug mit Manöverführung sitzen würden. Sie sollten jeweils dort die Taste drücken, an der sie der Meinung waren, dem Fahrzeug einen Befehl für die Handlung, welche im Video zu sehen ist, übermitteln zu müssen. Im zweiten Durchgang wurden diese Entscheidungspunkte nochmals betrachtet und die Probanden gebeten, die gesehenen Handlungen mit eigenen Worten zu benennen. Nachdem sich die Probanden die Einleitung durchgelesen hatten, wurde ihnen bei den Hauptversuchen als erstes ein kurzes Stück Autobahnverkehr (ca. 4 min) vorgespielt, damit sie sich mit dem Versuchsaufbau vertraut machen konnten. Anschließend wurde mit den Videos begonnen.

An den Versuchen haben 39 Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 65 Jahren teilgenommen. Der Altersdurchschnitt lag bei 34,69 Jahre ($\sigma = 14,50$ Jahre), 24 von 39 Versuchspersonen waren männlich.

Ergebnisse und Diskussion Die absolute Häufigkeit der Entscheidungspunkte über den Zeitverlauf des Autobahnvideos, aggregiert über alle Versuchspersonen, ist in Abb. 18 dargestellt. Für jede Sekunde, in der mehr als 5 Versuchspersonen einen Entscheidungspunkt gesetzt haben, wird angegeben, welche Besonderheit (z. B. welches Fahrmanöver nach Nagel & Enkelmann, 1991) gerade vorliegt. Es ist zu erkennen, dass dies nur die „Fahrstreifenwechsel“ sind. Es sind auf diesem Autobahnabschnitt keine anderen Manöver oder andere Besonderheiten identifiziert worden. Dass die Werte einer einzelnen Sekunde nie den absoluten Häufigkeitswert von 21 (was einer relativen Häufigkeit von $21/39 \approx 0,54$ entspricht) überschreiten, ist mit der nicht immer zeitgleichen Betätigung des Knopfes für das Setzen eines Entscheidungspunktes zu erklären. Lag ein Fahrstreifenwechsel im Video vor, haben einige Versuchspersonen schon sehr früh den Knopf betätigt, andere erst etwas später. Dies ist durch die Häufung von Entscheidungspunkten um die Maximastellen herum zu erkennen.

In Abb. 19 ist die Anzahl an Entscheidungspunkten für ein 3-s-Intervall um die lokalen Maxima (Anzahl der Entscheidungspunkte in einer Sekunde > 5) aufgetragen, die auch in Abb. 18 in der gleichen chronologischen Reihenfolge dargestellt sind. Zusätzlich zeigt Abb. 19 ein Ergebnis der retrospektiven Analyse, in der jede Versuchsperson die Aufgabe hatte, die zuvor gesetzten Entscheidungspunkte kurz und prägnant zu benennen. Da die Versuchspersonen frei antworten konnten, mussten die Aussagen den Manövern nach Nagel & Enkelmann (1991) zugeordnet werden, was durch drei unabhängige Evaluatoren bewerkstelligt wurde. Die endgültige Zuordnung ist im Anhang A dokumentiert. Dort sind nur Zuordnungen zu den Manövern „Fahrstreifenwechsel“ und „Überholen“ zu finden, da die Benennung der Versuchspersonen fast ausschließlich diese Manöver betraf. Die Kategorie „Sonstige“ enthält die Benennungen, die nicht dem „Fahrstreifenwechsel“ oder dem „Überholen“ zugeordnet werden konnten.

Insgesamt wurden in den 21 3-s-Intervallen 497 Entscheidungspunkte gegeben. Nach der Systematisierung (vgl. Anhang A) sind dabei 250 Entscheidungspunkte dem Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“, 166 dem Manöver „Fahrstreifenwechsel links“ und 74 dem Manöver „Überholen“ zugeordnet worden, weitere 7 sind in der Kategorie „Sonstige“ enthalten.

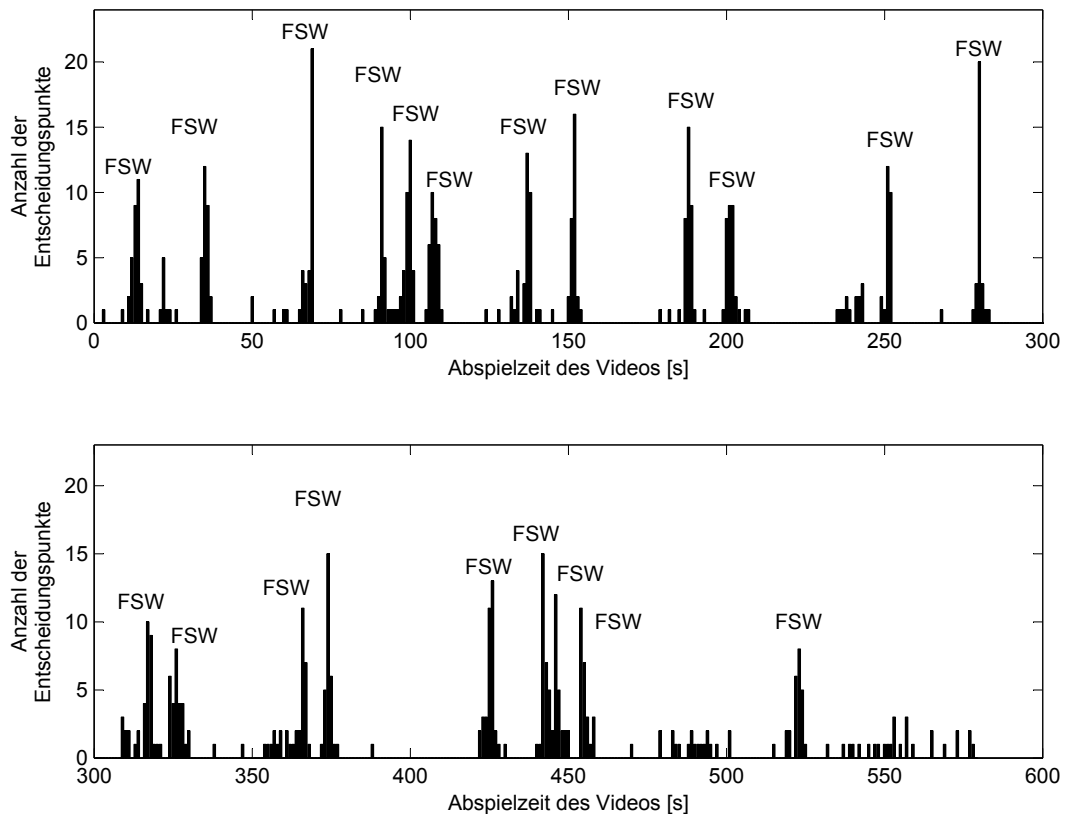


Abbildung 18: Ergebnisse der Entscheidungspunktanalyse – Anzahl der Entscheidungspunkte für jede Sekunde des Autobahnvideos ($N = 39$)

Das Manöver „Fahrstreifenwechsel“ ist hier in beide Ausprägungen rechts und links zerlegt worden, da auffällig ist, dass im Fall eines Wechsels vom linken auf den rechten Fahrstreifen fast ausschließlich Fahrstreifenwechsel benannt werden, diese Eindeutigkeit jedoch im umgekehrten Fall von rechts nach links nicht vorliegt. Ist im Autobahnvideo ein Fahrstreifenwechsel nach links zu sehen, wird dieses Manöver oft als „Überholen“ bezeichnet. Das Überholmanöver aus Sicht der Versuchsperson ist nicht mit dem Überholvorgang aus technischer Sicht zu vergleichen, bei dem zum Überholvorgang ein „Fahrstreifenwechsel links und rechts“ unterbrochen von einem Stück „Straßenverlauf folgen“ eingeteilt wird (Tölle, 1996). Die Versuchspersonen, die einen Fahrstreifenwechsel nach Nagel & Enkelmann (1991) auf einen benachbarten linken Fahrstreifen im Video gesehen und diesen als „Überholen“ benannt haben, haben trotzdem, nachdem ein oder mehrere Fahrzeuge passiert worden waren, einen Fahrstreifenwechsel nach rechts als Entscheidungspunkt gesetzt und diesen auch entsprechend benannt.

Die verwendete Autobahnversuchsstrecke ist ebenfalls nach den Manövern von Nagel & Enkelmann (1991) eingeteilt worden. Auf der Autobahn sind nur die Manöver „Straßenzug folgen“, „einem Fahrzeug folgen“, „Fahrspurwechsel nach rechts und links“, „Annähern“, „Überholen“, „rechts/links an einem Gegenstand vorbeifahren“, „vor einem Gegenstand anhalten“, „hinter einem Fahrzeug anfahren“ und „Stillstand“ möglich. Die letzten drei Manöver sind im Autobahnvideo nicht abgebildet worden.

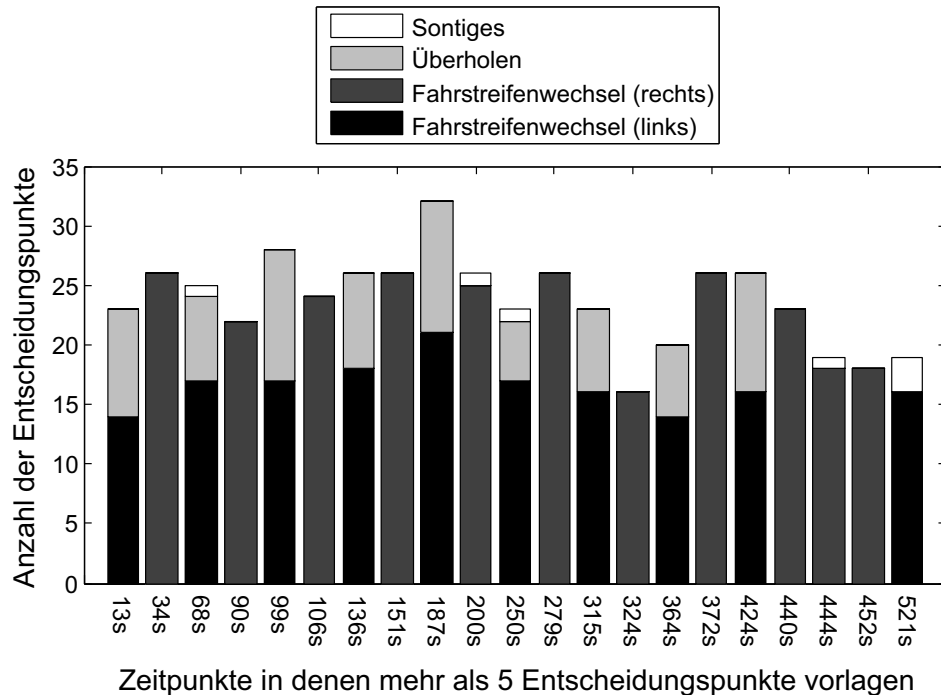


Abbildung 19: Benennung der Entscheidungspunkte durch die Versuchspersonen um die lokalen Maxima (jeweils eine Sekunde vor und nach dem lokalen Maxima, $N = 39$)

Manöverkatalog im Nutzungskontext Autobahn Wie die Ergebnisse zeigen, ist nur das Manöver „Fahrstreifenwechsel“ mit den Ausprägungen rechts und links auf der Autobahn eindeutig identifiziert worden (vgl. Abb. 20).

Die Versuche wurden ebenfalls in der Stadt durchgeführt (Schreiber *et al.*, 2010b). Es kam wieder die Entscheidungspunktanalyse zum Einsatz. Zusätzlich wurde die Methode „Lautes Denken“ eingesetzt. Die Ergebnisse sind, wie erwartet, nicht in dem Maße eindeutig wie bei der Autobahnfahrt. Es zeigt sich aber, dass für die Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991) und Bajcsy & Nagel (1996), die im Autobahnscenario vorkommen können, die Manöver „Anhalten“, „Anfahren“, „Überholen“ und „Stillstand“ mit über 50 % entdeckt worden sind. Die Manöver „Anhalten“ und „Anfahren“ werden daher in den Manöverkatalog für die prototypische Umsetzung der manöverbasierten Fahrzeugführung aufgenommen.

Das Manöver „Überholen“ wird aus zwei Gründen ausgeschlossen: Zum einen ist die Umsetzung aus technischer Sicht sehr kompliziert, da es im Vergleich zu anderen Manövern eine lange Zeit benötigt und da das zu überholende Fahrzeug einen Teil der Sicht für die Sensorik (Radar, Video) versperrt. Zum anderen ist es aber auch aus Sicht der Mensch-Maschine-Interaktion schwierig umzusetzen. Dem Fahrer ist vor oder bei Beauftragung eines Überholmanövers nicht unbedingt klar, welche Anzahl an Fahrzeugen er überholen möchte, da weiter vorne fahrende Fahrzeuge durch ein größeres Fahrzeug verdeckt werden könnten. Des Weiteren kann auf das Manöver verzichtet werden, weil das Ziel, eine oder mehrere Fahrzeuge zu überholen, auch mit einem „Fahrstreifenwechsel links“ bei zu geringer Egofahrzeuggeschwindigkeit, einer Parameteränderung der „Wunschgeschwindigkeit“ sowie einem „Fahrstreifenwechsel rechts“ erreicht werden kann.

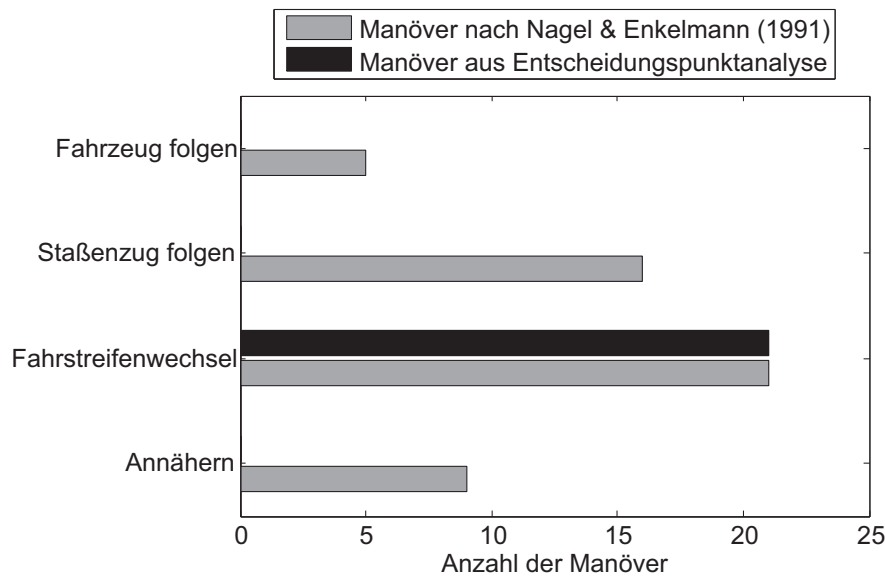


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Manöver aus der Entscheidungspunktanalyse und der Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991) für die Autobahn

Erstaunlich ist die Detektierung des Manövers „Stillstand“. Dieses Manöver passt für eine Beauftragung nur schlecht, da dies eigentlich ein Zustand ist, der durch das Manöver „Anhalten“ hergestellt wird und somit redundant wäre. Das Manöver wird daher nicht als explizites Manöver in den Manöverkatalog aufgenommen.

3.2.3 Konzept der expliziten und impliziten Fahrmanöver

Die Ergebnisse der Entscheidungspunktanalyse haben gezeigt, dass auf der Autobahn im Wesentlichen Fahrstreifenwechselmanöver beauftragt werden. Im Gegensatz dazu sind die Manöver „Straßenzug folgen“, „Fahrzeug folgen“ und „Annähern“ nicht vom Probanden identifiziert worden. Daraus wird geschlossen, dass diese Manöver bei einer manöverbasierten Fahrzeugführung nicht vom Fahrer beauftragt werden müssen, sondern das System diese Manöver automatisch ausführt.

Auf der Basis dieser Erkenntnis ist das Konzept der „expliziten und impliziten Manöver“ entwickelt worden. In Abb. 21 ist das Wechselspiel dieser beiden Manövertypen dargestellt. In dieser Abbildung stellen Kreise „Zustände“ und Pfeile „Übergangsbedingungen“ dar. Ausgehend vom Start einer Fahrmission führt der Fahrer das Fahrzeug im Zustand „Konventionelle Fahrzeugführung“, unter Umständen unterstützt durch Fahrerassistenzsysteme. Aus der konventionellen Fahrzeugführung heraus kann der Fahrer das System aktivieren und somit einen Zustandsübergang zur Ausführung eines impliziten Manövers herstellen.

Legt man den Manöverkatalog nach Nagel & Enkelmann (1991) (beschränkt auf Manöver, die auf der Autobahn möglich/erlaubt sind) und die Ergebnisse der Entscheidungspunktanalyse zugrunde, sind dies die Manöver „Straßenzug folgen“, „Annähern an einen sich vor dem Fahrzeug befindenden Gegenstand“, „vor einem Gegenstand anhalten“, „an einem Gegenstand vorbeifahren“, „einem Fahrzeug folgen“ und „Stillstand“. Jedes dieser Manöver wird nach der Aktivierung der manöverbasierten Fahrzeugführung selbständig

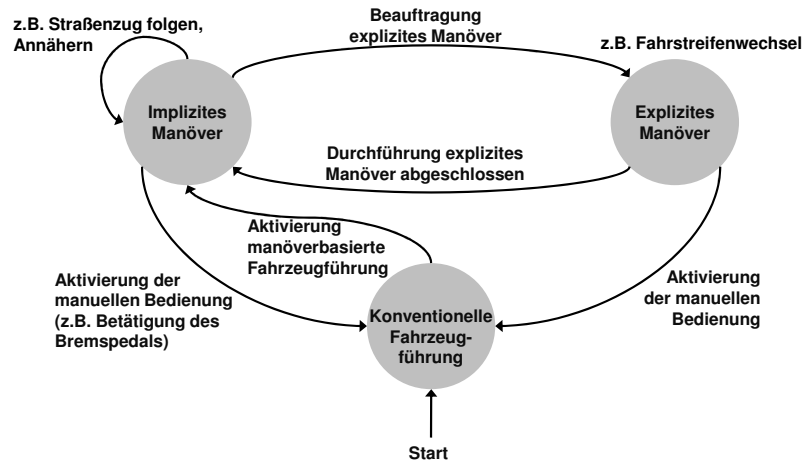


Abbildung 21: Konzept der „expliziten und impliziten Fahrmanöver“

vom Fahrzeug ausgeführt und beauftragt. Eine Verkettung von impliziten Fahrmanövern durch das technische System ist daher möglich, was durch den Zustandsübergang verdeutlicht wird, der vom impliziten Manöver auf sich selbst zeigt. Diese ist für die Interaktionsgestaltung nur von untergeordneter Bedeutung, es soll an dieser Stelle aber die Diskrepanz zwischen den Manövern, die technisch bewältigt werden müssen, und den vom Fahrer eingeteilten Manövern aufgezeigt werden. Die impliziten Manöver spielen in dieser Arbeit allerdings eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der manöverbasierten Fahrzeugführung im Fahrsimulator, da diese dort abgebildet werden müssen. Implizite Manöver sind nicht zwingend abgeschlossen, können also theoretisch von unendlicher Dauer sein. Ein Manöver „Straße folgen“ würde auf einer endlosen Straße nur anhand der Aktivierung eines expliziten Manövers oder dem Wechsel in den manuellen Modus beendet werden. Während der Durchführung eines impliziten Manövers kann der Fahrer unter bestimmten Randbedingungen (z. B. Fahrstreifen rechts neben dem Ego-Fahrstreifen ist vorhanden und frei) ein explizites Manöver (z. B. einen „Fahrstreifenwechsel rechts“) beauftragen. Dieses explizite Manöver wird anschließend vom System ausgeführt. Der Fahrer überwacht die Ausführung und kann bei Bedenken gegenüber der korrekten oder komfortablen Ausführung durch das System die Manöverführung deaktivieren (Zustandsübergang von explizitem Manöver zu konventioneller Fahrzeugführung). Wird das explizite Manöver nicht abgebrochen oder ein anderes explizites Manöver beauftragt, folgt nach seiner Vollendung wieder ein implizites Manöver. Dieses Zusammenspiel ist in Abb. 22 nochmals am Beispiel eines Fahrstreifenwechsels auf den linken Fahrstreifen auf einer zweifahrstreifigen Autobahn verdeutlicht.

Die manöverbasierte Fahrzeugführung ist eingeschaltet und folgt dem rechten Fahrstreifenverlauf (Stufe 1). An einer Stelle beauftragt der Fahrer das explizite Manöver „Fahrstreifenwechsel links“, erkennbar durch den Pfeil zwischen der Stufe 1 und der Stufe 2. Ist der Fahrstreifenwechsel abgeschlossen, folgt das Fahrzeug dem linken Fahrstreifen, führt also ein implizites Manöver aus, ohne dass eine Beauftragung durch den Fahrer erfolgt. Ein implizites Manöver ist somit ein durch die Automation aktivierter, vom Fahrer nicht bewusst eingeleiteter, und nicht zwingend endlicher Teil der Bahnführung. Ein explizites Manöver ist ein vom Fahrer bewusst gewähltes und der Automation übergebenes Manöver mit einem definierten Ende.

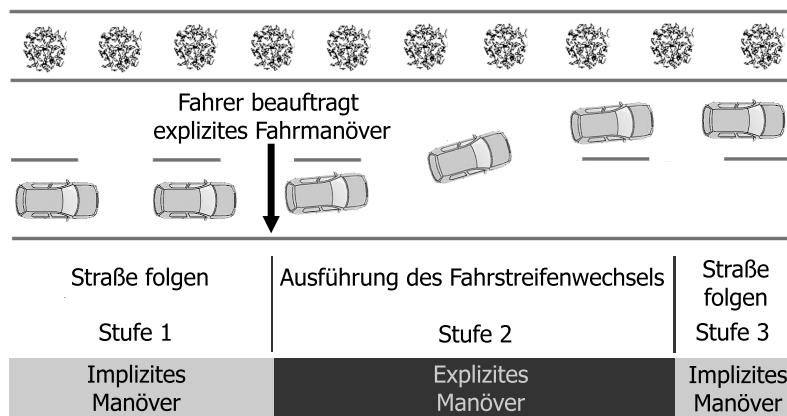


Abbildung 22: Wechselspiel zwischen expliziten und impliziten Manövern am Beispiel eines Fahrstreifenwechsels

Aus den Erklärungen werden die folgenden Definitionen abgeleitet:

Definition 1: Die **manöverbasierte Fahrzeugführung** ist ein Fahrzeugführungskonzept, bei dem der Fahrer das Fahrzeug auf *Bahnführungsebene* über explizite diskrete Manöverkommandos, deren Ausführung ein technisches System übernimmt, steuert. Der Fahrer kann jedoch zu jeder beliebigen Zeit das System über Parametereingaben anpassen oder deaktivieren, um auf Stabilisierungsebene über kontinuierliche Bedienelemente mit dem Fahrzeug zu kommunizieren.

Definition 2: Ein **explizites Fahrmanöver** ist ein aus der Sicht des Fahrers in sich abgeschlossener Teil der Bahnführungsaufgabe, der sich aus einer oder mehreren Änderungen der Sollwertvorgabe für Längs- und/oder Querführung zusammensetzt und bewusst vom Fahrer beauftragt wird.

Definition 3: Ein **implizites Fahrmanöver** ist ein nicht zwingend abgeschlossener Teil der Bahnführungsaufgabe des Fahrers, der durch ein explizites Manöver, ein anderes implizites Manöver oder durch das Fahrmissionsende beendet wird. **Implizite Manöver** werden nicht vom Fahrer, sondern selbständig vom System beauftragt und durchgeführt.

Definition 4: Das **Konzept der expliziten und impliziten Fahrmanöver** besagt, dass auf ein explizites Manöver, ohne dass Informationen zwischen dem Fahrer und dem technischen System ausgetauscht werden, immer ein implizites Manöver folgt, das vom Fahrer nicht beauftragt werden muss.

3.3 Frühevaluation mit Hilfe der *Wizard of Oz*-Technik

Da die Funktionsentwicklung von Fahrerassistenzsystemen und die Entwicklung von Mensch-Maschinen-Schnittstellen viele Ressourcen bindet und das Interaktionskonzept für die manöverbasierte Fahrzeugführung an vielen Stellen noch Fragen aufwirft, ist es zielführender, in einem vereinfachten Versuchsaufbau eine Frühevaluierung vorzunehmen (Schmidt *et al.*, 2008). Eine für diese Evaluierung ohne voll funktionstüchtigen Prototypen geeignete Methodik ist die *Wizard of Oz*-Technik, die ursprünglich entwickelt wurde,

um das Verhalten einer theoretisch intelligenten Computeranwendung (z. B. eine Sprachsteuerung) zu simulieren (Kelley, 1984). Im Hinblick auf Fahrerassistenzsysteme wird diese Methode sowohl in der Industrie (Schmidt *et al.*, 2008) als auch in der Forschung angewendet (Schomerus *et al.*, 2006; Schieben *et al.*, 2009; Schreiber *et al.*, 2010a).

Bei der *Wizard of Oz*-Technik handelt es sich um einen Versuchsaufbau, der es erlaubt, neue Systeme durch Probandenstudien zu testen, bevor ein funktionsfähiger Prototyp vorhanden ist. Hierfür werden Funktionen des technischen Systems durch einen Menschen (den *Wizard*) simuliert. Um verwertbare Ergebnisse zu erhalten, ist es wichtig, dass die Versuchspersonen glauben, sie interagierten mit einem realen technischen System. Das Wissen über die Simulation durch den *Wizard* würde die Beurteilung des Systems durch die Versuchspersonen beeinflussen (Dow *et al.*, 2005). Beim Versuchsaufbau wird daher besonderes Augenmerk darauf gelegt, die Täuschung während der Durchführung aufrechterhalten zu können.

3.3.1 Versuchskonzept und Versuchsdurchführung

Der *Wizard of Oz*-Versuchsaufbau ist im Fahrsimulator implementiert worden. Die für den Versuch vorhandenen Räumlichkeiten am *Institut für Arbeitswissenschaft* der TU Darmstadt sind dafür ideal, da zum Fahrsimulator ein großer Raum, in dem das Fahrzeug-Mock-Up steht, und ein weiterer kleiner Raum, in dem der Platz des *Wizard* eingerichtet wurde, zur Verfügung stehen. Das Mock-Up besteht aus einem Armaturenbrett eines Opel-Astra-Cockpits mit einem elektrisch verstellbaren Fahrersitz. Die Ein- und Ausgabeelemente (Pedale, Lenkrad, Blinker, Lautsprecher etc.) haben eine Verbindung zu einem Computer, auf dem das Fahrsimulatorprogramm *STISIM Drive* (Build 2.08.04) läuft.

Für die Frühevaluierung der manöverbasierten Fahrzeugführung werden die Manöver durch den *Wizard* ausgeführt. Die Interaktion zwischen Fahrer und technischem System erfolgt über eine simulierte Sprachsteuerung, bei der der Proband davon ausgeht, dass eine Spracherkennung hinterlegt ist. Die geäußerten Manöver werden aber nicht durch ein technisches System erkannt, sondern über ein Mikrofon vom Simulationsraum zum *Wizard*-Raum auf die Kopfhörer des *Wizards* übertragen, der das entsprechende Manöver ausführt.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 23 dargestellt. Im Simulationsraum befindet sich der Arbeitsplatz des Versuchsleiters (1). Ihm obliegt die Steuerung des Fahrsimulatorrechners. Der *Wizard* befindet sich im *Wizard*-Raum (3) und kann über ein Lenkrad und Pedale (*Logitech Formula Vibration Feedback Wheel*) das Fahrzeug des Simulationsrechners steuern. Über einen Monitor und Kopfhörer werden ihm die identischen visuellen und akustischen Rückmeldungen der Fahrsimulation wie dem Probanden gegeben. Der *Wizard* hat außerdem die Möglichkeit einen Warnton an die Versuchspersonen zurückzumelden, der beispielsweise verwendet wurde, wenn der Proband ein Manöver beauftragt hat, das in dieser Situation nicht ausgeführt werden konnte (z. B. die Beauftragung eines „Fahrstreifenwechsel links“, wenn sich das Egofahrzeug gerade auf dem linken Fahrstreifen befindet). Die Versuchsperson nimmt in der Sitzkiste des Fahrsimulators (2) Platz. Die verbal gegebenen Manöverkommandos werden über das Mikrofon (4) an den *Wizard* übermittelt. Ein Beamer (6) bewerkstelligt die Darstellung der Fahrumgebung (7).

Links neben dem Probanden befindet sich eine Metaplanwand, auf der die Manöver nochmals aufgelistet sind. Zwischen dem *Wizard*-Raum und dem Simulationsraum wurde eine Netzwerkverbindung hergestellt, über die schriftliche Kurzmitteilungen geschickt werden konnten. Die Kommunikationsmöglichkeit zwischen dem *Wizard* und dem Versuchslei-

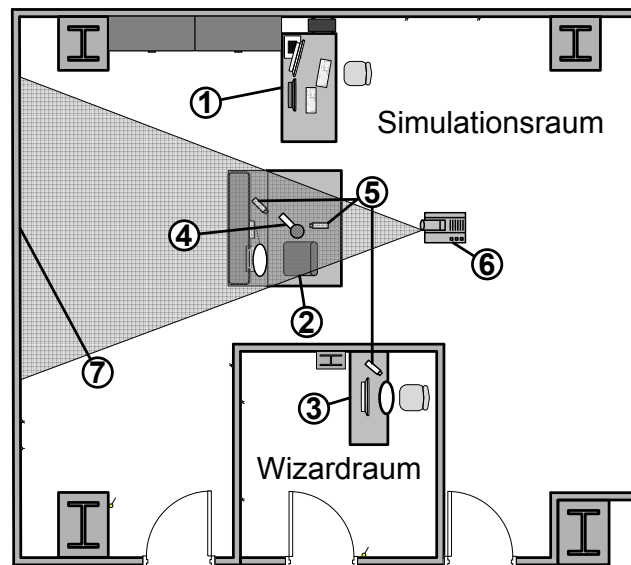


Abbildung 23: Versuchsaufbau der *Wizard of Oz*-Technik im Fahrsimulator; 1. Arbeitsplatz des Versuchsleiters/Simulationsrechners, 2. Fahrersitz, 3. Arbeitsplatz des *Wizard*, 4. Mikrophon, 5. Videokameras, 6. Beamer, 7. Projektion des Fahrsimulatorbildes/Fahrumgebung

ter ist wichtig, um zu gewährleisten, dass in unvorhergesehenen Situationen (wie etwa bei auftretenden technischen Störungen) Probleme gemeldet und kurz diskutiert werden konnten, um die Täuschung der Probanden während des Versuchs aufrechtzuerhalten. Der *Wizard* muss das Verhalten eines technischen Systems konsistent imitieren. Liegen große Unterschiede in der Ausführung vor, ist zum einen eine Vergleichbarkeit der Beurteilung verschiedener Versuchspersonen eingeschränkt, zum anderen kann die Täuschung entdeckt werden. Um ein möglichst gutes *Wizard*-Verhalten zu gewährleisten, sind verschiedene Maßnahmen getroffen worden:

1. Der *Wizard* hat die Versuchsstrecken, die im Fahrsimulator zu fahren waren, selber programmiert. Das Verhalten von Fremdverkehr und Sondersituationen ist für den *Wizard* somit verständlicher und besser präzifizierbar.
2. Dem *Wizard* wurde ein Tempomat zur Verfügung gestellt. Er konnte damit die Wunschgeschwindigkeit des Probanden festsetzen und muss sich nicht auf die Längsgeschwindigkeitsregelung konzentrieren.
3. Der *Wizard* hat jede Strecke vor dem Versuchsbeginn mehrmals durchfahren, und es wurden hypothetische Manöver beauftragt.
4. Während des gesamten Versuchs wurde der *Wizard* nie ausgetauscht, es war immer die gleiche Person.
5. Es wurden Vorversuche durchgeführt. Sie dienen der Identifizierung von kritischen Situationen, die während den Versuchen auftreten können. Aus diesen Erkenntnissen wurden entsprechende Verhaltensregeln für den *Wizard* definiert. Das Training und die Gewöhnung an Bedienelemente und Fahrsimulatorumgebung sind ebenfalls wichtige Aspekte für eine gleichmäßige Fahrleistung des *Wizards* in den Versuchen.

In den Versuchen wurden Autobahn-, Stadt- und Landstraßenstrecken gefahren. Im Folgenden werden nur die Autobahnfahrten dargestellt, die mit der virtuellen Sprachsteuerung durchgeführt wurden. In diesem Abschnitt werden die Begriffe „Fahrstreifen“ und „Spur“ sowie „Fahrstreifenwechsel“ und „Spurwechsel“ synonym verwendet, da für die Sprachsteuerung der allgemein gebräuchlichere Begriff des Spurwechsels verwendet wird. Dies hat außerdem den Vorteil, dass die Kommandos von den Versuchspersonen schneller gegeben werden können („Spurwechsel“ hat im Vergleich zum „Fahrstreifenwechsel“ zwei Silben weniger).

Anfahren Fahrzeug fährt aus dem „Stillstand“ an und beschleunigt auf die vom Fahrer vorgegebene Geschwindigkeit (bzw. höchste zulässige Geschwindigkeit). Das Manöver geht automatisch in das Manöver „Straße folgen“ über.

Straße folgen Fahrzeug folgt der Vorfahrtstraße auf der aktuellen Spur mit der vorgegebenen Geschwindigkeit (bzw. höchste zulässige Geschwindigkeit). Nähert sich das Fahrzeug einem vorausfahrenden langsameren Fahrzeug, wird die Geschwindigkeit dementsprechend angepasst und die derzeitige Fahrspur gehalten, falls keine anders lautende Eingabe vom Fahrer erfolgt. Dieses Manöver dient auch als Abbruch für vorher beauftragte explizite Manöver.

Spurwechsel (rechts und links) Fahrzeug wechselt vom aktuellen Fahrstreifen auf den benachbarten linken bzw. rechten Fahrstreifen und geht dann wieder automatisch in das Manöver „Straße folgen“ über. Die Geschwindigkeit wird dabei beibehalten.

Überholen Fahrzeug schert nach links aus, fährt an vorausfahrendem Fahrzeug/ vorausfahrenden Fahrzeugen vorbei und ordnet sich wieder auf der ursprünglichen Spur ein. Das Manöver geht automatisch in das Manöver „Straße folgen“ über.

Es wurden diverse Fragebögen bei den Versuchen eingesetzt, um den subjektiven Eindruck der Versuchspersonen zu erfassen. Außerdem wurden Fahrzeugdaten aufgezeichnet (Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung, Position auf dem Fahrstreifen etc.) und Videos aufgenommen, die aus drei Einzelaufnahmen (Versuchsperson, *Wizard* und Simulationsbild) in einem Multiplexer zeitgleich aufgezeichnet wurden. Das Video wurde mit einer Tonspur versehen, auf der die Manöveraufträge der Probanden aufgezeichnet wurden (identisches Audiosignal, wie der *Wizard* es auf dem Kopfhörer hört).

An der Untersuchung nahmen 31 Versuchspersonen teil. 17 Probanden waren weiblich, das durchschnittliche Alter der Teilnehmer war 35,81 Jahre ($\sigma = 15,62$ Jahre). Der jüngste Teilnehmer war 18 Jahre alt, der älteste 67 Jahre. Die Probanden besaßen im Durchschnitt 17,37 Jahre den PKW-Führerschein.

3.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Für die Datenauswertung wurden die mit dem Multiplexer aufgenommenen Videos, die Fragebögen und die Fahrzeugdaten, die der Fahrsimulator aufzeichnet, verwendet. Aus den Videos und deren Tonspuren, auf denen die Manöverkommandos der Versuchspersonen zu hören sind, wurden die beauftragten Manöver ermittelt. In Abb. 24 ist die Anzahl der verschiedenen Manöver für jede der 31 Versuchspersonen, die die Simulatorfahrt beendet haben, dargestellt.

Das Manöver „Anfahren“ kam in der Regel ein Mal pro Versuchsperson vor. Die Fahrsimulatorsoftware startet Szenarios immer auf dem linken Fahrstreifen im Stillstand. Daher

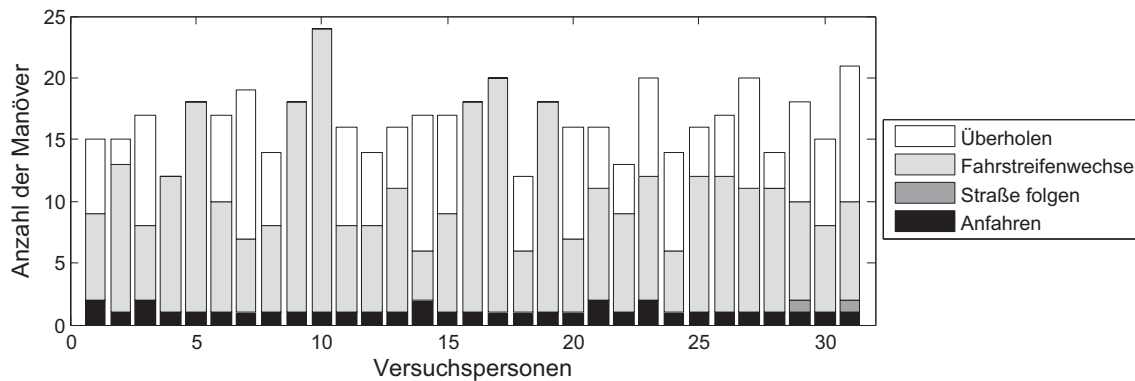


Abbildung 24: Anzahl der von den Versuchspersonen beauftragten Manöver im *Wizard of Oz*-Experiment ($N = 31$)

mussten die Versuchspersonen das Manöver beauftragen, um das Fahrzeug in Bewegung zu setzen. Ist das Fahrzeug auf der Versuchsstrecke zum Stehen gekommen (z. B. weil ein Vorfahrer zum Stehen gekommen ist), muss das Manöver erneut beauftragt werden. Dies ist insgesamt nur fünf Mal der Fall gewesen.

Das Manöver „Straße folgen“ wurde nur von zwei Versuchspersonen (Nr. 29 und Nr. 31) jeweils ein Mal beauftragt. Dieses Ergebnis belegt das theoretische Konzept der „expliziten und impliziten Fahrmanöver“, da den Versuchspersonen das Manöver zur Verfügung gestellt worden war, sie es aber nicht verwendet haben.

Neben der Evaluierung des Konzepts der expliziten und impliziten Fahrmanöver war der zweite Fokus die Unterscheidung zwischen den Manövern „Fahrstreifenwechsel“ und „Überholen“, das ein aggregiertes Manöver aus einem „Fahrstreifenwechsel links“, einem Abschnitt „Straße folgen“ (bis das zu überholende Fahrzeug passiert wurde) und einem „Fahrstreifenwechsel rechts“ auf den Ursprungsfahrstreifen ist. Wie in Abb. 24 dargestellt, wurde das Überholmanöver relativ häufig verwendet. Dennoch traten bei der Verwendung dieses Manövers einige Schwierigkeiten auf. Den Versuchspersonen war nicht klar, wie viele Fahrzeuge vor ihnen überholt werden. Dies führt aus Sicht der Versuchspersonen zu unerwarteten Fahrstreifenwechseln, beispielsweise beim Überholen einer Kolonne und einem Wiedereinscheren zwischen zwei Fahrzeugen.

In Abb. 25 sind die Beauftragung der einzelnen Manöver („Anfahren“, „Straße folgen“, „Fahrstreifenwechsel“) und der Manöver insgesamt dargestellt. Das Manöver „Fahrstreifenwechsel“ wurde am häufigsten verwendet. Durchschnittlich hat jede Versuchsperson 16,68 ($\sigma = 2,69$) Manöver beauftragt. Bezogen auf die Versuchsstrecke (ca. 9,1 km) sind durchschnittliche 1,83 Manöver pro Kilometer beauftragt worden. Dies zeigt eine hohe Interaktionshäufigkeit mit dem manöverbasierten Assistenzsystem. Die Versuchspersonen haben das Fahrzeugführungskonzept ausnahmslos angenommen und ausprobiert, da selbst das Minimum der Manöveraufträge für eine Versuchsperson den Wert von 12 Manövern (1,32 Manöver pro Kilometer) aufweist (vgl. auch Abb. 24, Versuchsperson Nr. 4). Die angebotenen Manöver wurden von den Versuchspersonen gut angenommen. Da es aber trotzdem sein könnte, dass den Versuchspersonen Manöver bei der Interaktion auf der Autobahn gefehlt haben, wurde im Anschluss an die *Wizard of Oz*-Simulation in einem der Fragebögen direkt nach fehlenden Manövern gefragt. Die Antworten der Versuchspersonen sind in Anhang B dargestellt. Auffällig ist nur, dass mehrere Versuchs-

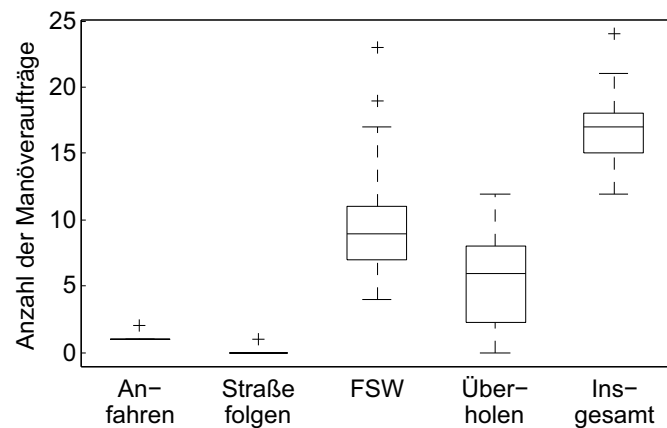


Abbildung 25: Anzahl der Beauftragten Manöver im *Wizard of Oz*-Experiment ($N = 31$)

personen ein Überholmanöver, bei dem mehrere Fahrzeuge überholt werden, gefordert haben. Dies verdeutlicht die Problematik des Manövers „Überholen“. Des Weiteren wurde mehrere Mal eine Möglichkeit zur Geschwindigkeitsveränderung des Egofahrzeuges gefordert, die im *Wizard of Oz*-Experiment gefehlt hat (die Versuchspersonen haben die Wunschgeschwindigkeit am Anfang der Versuche festgelegt). Dies ist für die Umsetzung einer manöverbasierten Fahrzeugführung wichtig und wird für eine später Umsetzung berücksichtigt.

Neben der Interaktionshäufigkeit wurden die Versuchspersonen auch nach ihrer subjektiven Einschätzung der Manöver gefragt. Unter anderem trafen die Versuchspersonen eine Einschätzung, wie „angenehm“ die Ausführung der Fahrmanöver war. In Abb. 26 sind die Bewertungen zur Frage „Wie empfanden Sie die Ausführung der Manöver, die vom System durchgeführt wurden? Bitte bewerten sie jedes Manöver einzeln.“ für die Manöver, die auf der Autobahn vorkamen, gezeigt.

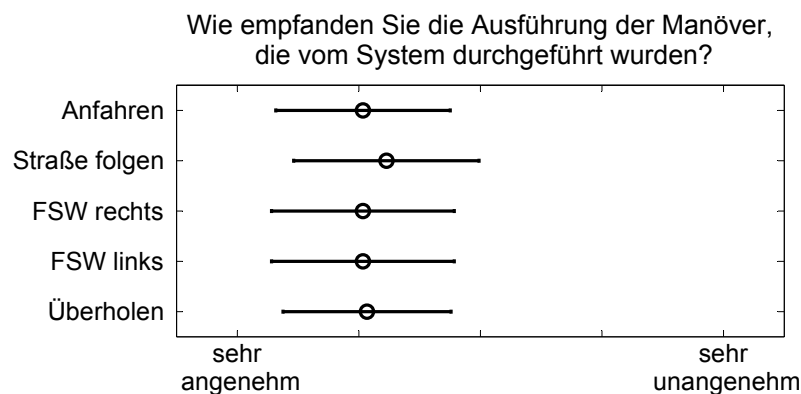


Abbildung 26: Bewertung der Manöverausführung in der *Wizard of Oz*-Studie ($N = 31$)

Das Manöver „Fahrstreifenwechsel“ wurde in den Unterkategorien „rechts“ und „links“ erfragt, da der kurzfristige weitere Verlauf der Fahrmission sowie das Ziel, das mit dem Manöver verfolgt wird, für einen „Fahrstreifenwechsel rechts“ anders sein kann. Insgesamt sind alle Manöver sehr positiv beurteilt worden (Mittelwerte der Beurteilung liegen

zwischen 2,03 und 2,23 auf einer Skala von 1 bis 5, wobei 1 sehr angenehm und 5 sehr unangenehm ist). Die Bewertung muss allerdings mit Einschränkung gesehen werden, da für die Querregelung die Übertragbarkeit auf die Realität mit einer Simulation von Querschleunigungskräften besser zu leisten ist (Blaauw, 1982), die im statischen Fahr-simulator jedoch fehlt.

Neben der Ausführung wurde auch gefragt, ob die Ausführung der Manöver den Erwartungen der Versuchspersonen entsprochen hat. Die Ergebnisse sind in Abb. 27 dargestellt. Die Bewertungen fallen ebenfalls positiv aus und liegen alle über dem Wert 2 (ebenfalls auf einer Skala von 1 bis 5 wobei 1 vollkommen entsprochen und 5 überhaupt nicht entsprochen bedeutet). Überraschend ist die gute Bewertung des Manövers „Überholen“, obwohl sich dort einige Probleme gezeigt haben. Es sind kaum Unterschiede zwischen den Manövern zu erkennen, lediglich das Manöver „Anfahren“ ist tendenziell besser bewertet worden (1,45).

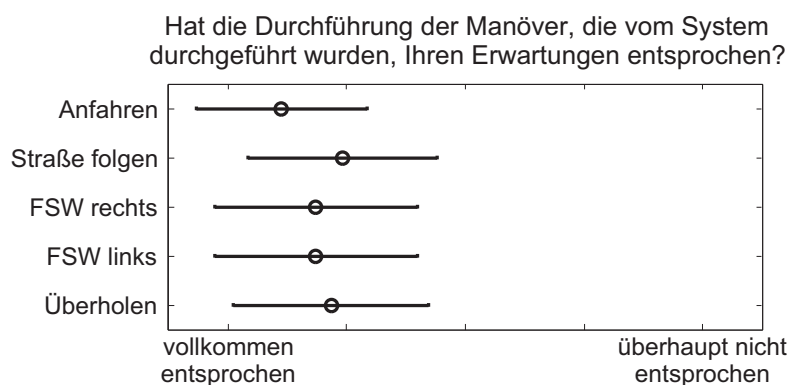


Abbildung 27: Bewertung der Erwartungserfüllung der Manöver in der *Wizard of Oz*-Studie ($N = 31$)

Die *Wizard of Oz*-Studie hat gezeigt, dass die Versuchspersonen das Wechselspiel zwischen von ihnen zu beauftragenden expliziten Manövern und dem automatischen Aktivieren von impliziten Manövern durch das System verstanden haben. Die weitere Interaktionsgestaltung wird sich daher an diesem Konzept orientieren. Der Manöverkatalog wird für das Autobahnszenario auf die expliziten Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“, „Fahrstreifenwechsel links“ und „Anfahren“ sowie auf die implizite Manöver „Straße folgen“ und „Stillstand“ festgelegt. Das Manöver „Überholen“ wird vorerst aus der Betrachtung ausgeschlossen, da

1. ein für den Fahrer konsistentes Manöver „Überholen“ aufgrund der Frage, bei welchem Abstand zwischen zwei Vorfahrenden das Egofahrzeug wiedereinscheren soll, nicht angeboten werden kann,
2. ein Überholvorgang alternativ durch mehrere Fahrstreifenwechsel bewerkstelligt werden kann,
3. aus technischer Sicht ein „Überholen“ ein relativ langes und komplexes explizites Manöver ist. Es existieren zwar bereits Prototypen für Überholassistentensysteme (für einen Prototypen eines Überholassistenten auf Landstraßen vgl. Hohm, 2010 und Isermann *et al.*, 2009), diese operieren allerdings nur unter bestimmten Randbedingungen (z. B. keine Kurven oder große Kurvenradien).

3.4 Konzept manöverbasierte Fahrzeugführung

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, wird die Interaktionsgestaltung gemäß dem Konzept der „expliziten und impliziten Fahrmanöver“ entwickelt. Dies ist allerdings nur ein grundlegendes Konstrukt, das noch keine Bedienelemente und Anzeigen festlegt oder gar definiert, wann der Fahrer welche Information erhalten soll. In diesem Kapitel wird daher zunächst der Funktionsumfang definiert, der für die manöverbasierte Fahrzeugführung zur Verfügung steht. Dabei wird sich an aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen, aber vor allem an den Arbeiten des *Fachgebiet Fahrzeugtechnik* der TU Darmstadt, orientiert, die eine Funktionsentwicklung für die technische Realisierung von *Conduct-by-Wire* mit einer *Software in the Loop*-Simulation in *IPG CarMaker* vorbereiten.

Für die Evaluierung der manöverbasierten Fahrzeugführung wird dem Manöverkatalog noch das Manöver „rechts ranfahren“ hinzugefügt, da überprüft werden sollte, ob andere komplexe Manöver (im Vergleich zum Überholen) für die Nutzer nützlich sein könnten.

3.4.1 Festlegung des Funktionsumfangs für die manöverbasierte Fahrzeugführung

Nach Hakuli *et al.* (2010a) und Hakuli *et al.* (2010b) wird der Funktionsumfang eines *Conduct-by-Wire*-Fahrzeugs in Längs- und Querführungsfunktionen aufgeteilt. Zu den Längsführungsfunktionen gehören beispielsweise die Geschwindigkeitsregelung (ähnlich dem Tempomaten) oder die Folgeregelung zu einem vorausfahrendem Fahrzeug (ACC) und eine Zielbremsung (ACC Stop & GO bei vorausfahrendem, zum Stehen kommenden Fahrzeug). Die Querführung beinhaltet Funktionen wie das Halten des Fahrstreifens (LKAS) oder den Fahrstreifenwechsel (noch kein Fahrerassistenzsystem vorhanden, ein Beispiel für autonome Fahrstreifenwechsel gibt es aber bei autonomen Fahrzeugen; vgl. Gray *et al.*, 2007; McBride, 2007).

Für die Festlegung des Automationsumfangs des hier zu evaluierenden Systems sind dies Hinweise auf einen Funktionsumfang, den ein Fahrzeug, das mit einer manöverbasierten Fahrzeugsteuerung ausgerüstet ist, besitzen kann. Neben den oben beschriebenen Funktionen wird eine Verkehrsschilderkennung miteinbezogen. Dieses System nimmt über eine Kamera beispielsweise Informationen zu aktuellen Tempolimits auf. Diese Systeme sind heute schon in Fahrzeugen vorhanden und zeigen dem Fahrer die aktuell zulässige Geschwindigkeit an. Eine Kopplung dieser Information mit Fahrerassistenzsystemen der Längsführung (speziell ACC) ist derzeit noch nicht vollzogen, wird aber für die Entwicklung angenommen. Das bedeutet, wenn das System das Geschwindigkeitsbegrenzungsschild richtig erkannt hat, wird die Wunschgeschwindigkeit der ACC-Funktion auf diesen Wert gesetzt.

Des Weiteren wird ein Fahrstreifenwechselassistent in die Betrachtung miteingeschlossen. Auch dies ist ein System, mit dem heutige Fahrzeuge ausgerüstet werden. Für die Festlegung des Funktionsumfangs werden die Informationen des Fahrstreifenwechselassistenten mit dem Fahrstreifenwechselmanöver verbunden, so dass ein Fahrstreifenwechsel nur dann durchgeführt wird, wenn der Zielfahrstreifen frei ist.

Das vom System autonom durchzuführendene Manöver „Fahrstreifenwechsel“ wird nach Tölle (1996) entwickelt, der eine Sigmoidfunktion als Sollwertvorgabe der Regelung vorschlägt. Alle Funktionen, die für die Umsetzung des Prototypen eingesetzt wurden, sind in Tab. 7 zusammengefasst.

Fahrerassistenzsysteme	Beschreibung
ACC Stop & Go (inkl. Tempomat)	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung der Geschwindigkeit bei freier Fahrt anhand einer Wunschgeschwindigkeit • Abstandsregelung zu einem vorausfahrenden Fahrzeug anhand einer vom Fahrer definierten Zeitlücke • Erweiterung des heutigen ACC um die Erkennung von stehenden Fahrzeugen
Fahrstreifenwechselassistentz	<ul style="list-style-type: none"> • Überwacht die benachbarten Fahrstreifen (rechts und links vom Egofahrzeug) • Verhindert die Ausführung eines Fahrstreifenwechsels
Lane Keeping Assistant System	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung der Querposition des Egofahrzeugs auf die Fahrstreifenmitte bzw. auf eine vom Fahrer eingestellte Sollposition
Fahrstreifenwechselregelung	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung des Fahrstreifenwechsels anhand der Sollwertvorgabe einer Sigmoidfunktion nach Tölle (1996)
Verkehrsschilderkennung	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennung von Geschwindigkeitsschildern und Übermittlung dieser Information an das ACC zur automatischen Einstellung der Wunschgeschwindigkeit

Tabelle 7: Zusammenfassung der Fahrerassistenzfunktionen, die für die prototypische Umsetzung im Fahrsimulator verwendet wurden

3.4.2 Festlegung der Interaktion für die Manöversteuerung

Um die vorgestellten Konzepte in einen Fahrsimulatorprototypen zu überführen, muss eine Festlegung der Interaktion stattfinden. Dafür müssen die in diesem Kapitel gezeigten Ansätze und Ergebnisse in ein Gesamtkonzept umgesetzt werden, an dem eine Programmierung im Fahrsimulator und die Schnittstellengestaltung angelehnt werden kann. Auf Basis des in Kapitel 3.1.3 vorgestellten Modells ist festgelegt, dass es sowohl ein kontinuierliches Bedienelement für die Interaktion auf *Stabilisierungsebene* als auch ein Bedienelement für die Manöver- und Parameterübergabe (also auf *Bahnführungsebene*) vorhanden sein muss.

Für die *Stabilisierungsebene* werden die konventionellen Bedienelemente aus heutigen Fahrzeugen ausgewählt. Obwohl beispielsweise Sidesticks eine besser Erfüllung der Stabilisierungsaufgabe gewährleisten können (Eckstein, 2001) und viele Alternativen zu den heutigen Bedienelementen (z. B. Bedienelemente des Mercedes-Forschungsfahrzeugs F200 Daimler Chrysler, 1996, das Bedienelement *Guida* aus dem *SKF-Bertone Filo*, Bertone, 2001 oder das *X-Drive* aus dem GM *Hy-Wire*-Fahrzeug, Harris, 2003) vorgestellt

wurden, ist nicht zu erwarten, dass eine solch weitreichende Änderung der Benutzerschnittstelle möglich ist. Eine umfassende Darstellung von alternativen Bedienelementen kann Winner & Heuss (2005) entnommen werden.

Für die Manöverbeauftragung müssen diskrete Signale übergeben werden können. Außerdem soll das System nur Manöver anbieten, die in der jeweiligen Fahrsituation auch ausführbar sind. Die Schnittstelle muss somit auch die Möglichkeit der Anzeige bieten. Die detaillierte Festlegung der Interaktion erfolgt in Form einer Programmablaufstruktur (vgl. Kauer *et al.*, 2010b). In Abb. 28 ist diese Struktur dargestellt. Rauten stellen Verzweigungspunkte da, die eine Entscheidungsfrage beinhalten, die immer mit den zwei Antwortmöglichkeiten (und damit Ausgängen) „Ja“ und „Nein“ beantwortet werden muss. Auf die Darstellung der manuellen Bedienung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Da immer in den manuellen Modus gewechselt werden kann, befindet sich nach jeder gezeigten Verzweigung eine weitere Verzweigung (nicht in Abb. 28 dargestellt), die fragt, ob der Fahrer die manuelle Steuerung übernommen hat. Im Folgenden wird nur auf die Interaktion während der Manöverführung eingegangen.

Der Beginn einer Fahrmission findet im impliziten Manöver „Stillstand“ statt, das sich oben links befindet. Solange der Fahrer keine Eingaben tätigt, wird er bei diesem Manöver verbleiben (wie in Kapitel 3.2.3 festgelegt, haben implizite Manöver kein definiertes Ende). Aus dem Manöver „Stillstand“ kann der Fahrer nur in Bewegung kommen, wenn er das Manöver „Anfahren“ beauftragt. Dies beinhaltet auch die Eingabe einer „Wunschgeschwindigkeit“ (nicht in Abb. 28 darstellt), da diese den Default 0 besitzt. Beauftragt der Fahrer das Manöver „Anfahren“, führt dies zum Manöver „Straße folgen“ (das Manöver „Straße folgen“ beinhaltet die funktional vorhandenen, aber vom Fahrer nicht zu beauftragenden Manöver nach Nagel & Enkelmann, 1991, wie „Annähern“ oder „Fahrzeug folgen“). Das Manöver „Anfahren“ ist theoretisch nur in einem Zeitpunkt aktiv, in dem sich das Fahrzeug in Bewegung setzt. Diese Prozedur muss ebenfalls durchlaufen werden, wenn das Egofahrzeug in den Stillstand verzögert hat, was in dem in dieser Arbeit fokussierten Nutzungsszenario der Autobahnfahrten nur selten vorkommen wird, aber aufgrund von Staus nicht ausgeschlossen werden kann.

Ist das Fahrzeug vom Fahrer in Bewegung gesetzt worden und im impliziten Manöver „Straße folgen“ angekommen, ermittelt die Fahrzeugsensorik, ob Fahrstreifen rechts und links neben dem Egofahrstreifen vorhanden sind. Es wird in dieser Programmablaufstruktur zwischen den Verzweigungen „Fahrstreifen vorhanden“ und „Fahrstreifen frei“ unterschieden. In „Fahrstreifen vorhanden“ wird nur die Existenz eines Fahrstreifens rechts und links neben dem Egofahrstreifen überprüft. Solange ein Fahrstreifen in der jeweiligen Richtung existiert, wird vom System ein „Fahrstreifenwechsel“ angeboten, der auch beauftragt werden kann, wenn sich auf dem Zielfahrstreifen ein Objekt (z. B. ein Fahrzeug) befindet. Beauftragt der Fahrer einen „Fahrstreifenwechsel“, wird ein Timer gestartet, der ohne weitere Eingaben des Fahrers 10 Sekunden lang den Manöverwunsch des Fahrers speichert. Anschließend wird überprüft, ob der Zielfahrstreifen frei ist. Ist dies nicht der Fall, wird das Manöver, wie eben erwähnt, gespeichert. Nach 8 Sekunden wird dem Fahrer durch ein Blinken des ausgewählten Manövericons der Ablauf des Timers signalisiert, und der Fahrer hat weitere 2 Sekunden Zeit, den Manöverwunsch erneut zu kommunizieren und damit den Timer wieder auf 0 zu setzen. Ist während der Phase der Vorhaltung eines Manövers der Zielfahrstreifen frei, wechselt das Egofahrzeug selbstständig den Fahrstreifen, sofern der Fahrer nicht das Manöver durch Auswahl des Manövers „Straße folgen“ abbricht.

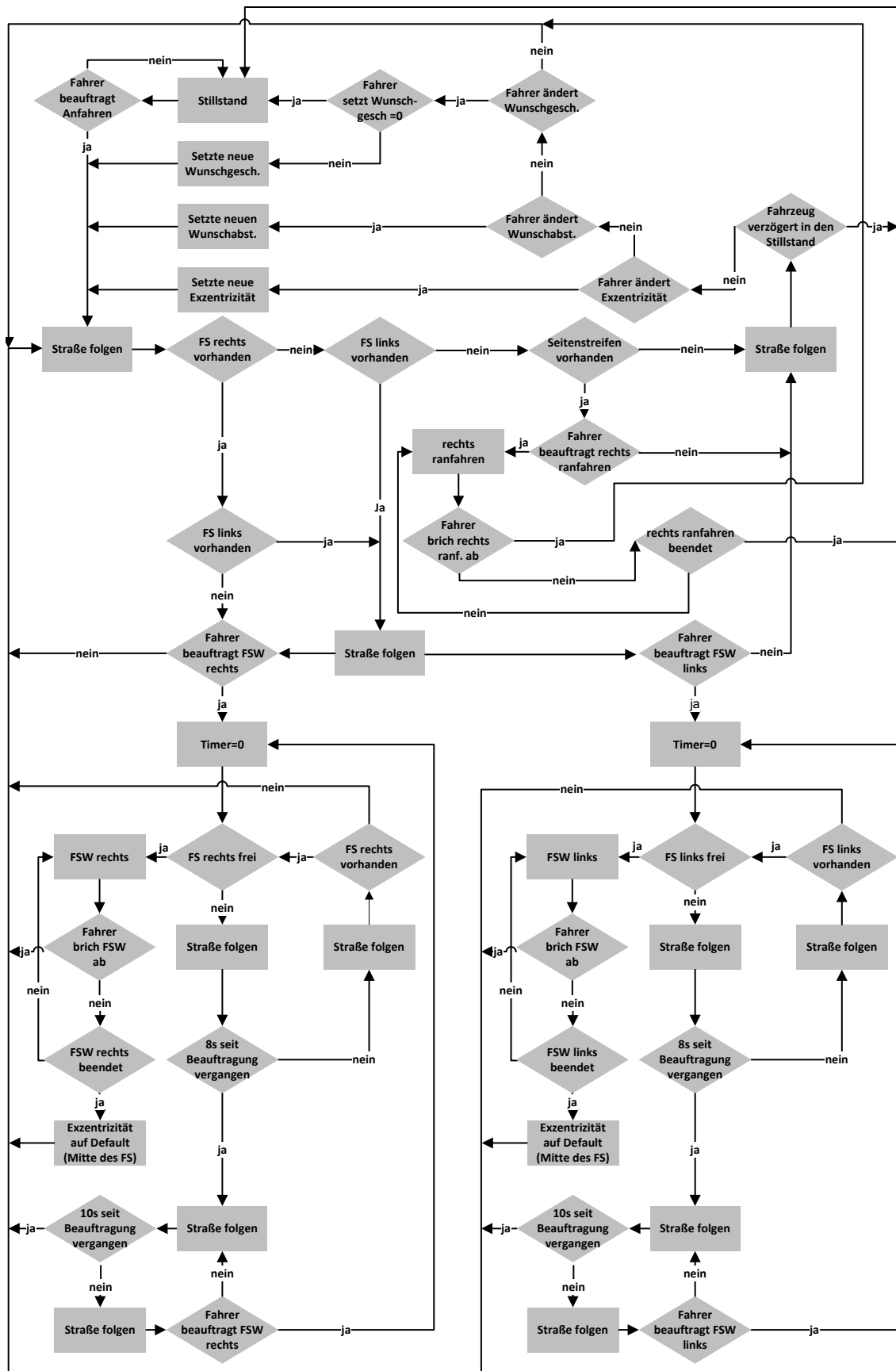


Abbildung 28: Programmablaufstruktur für die Interaktion bei der manöverbasierten Fahrzeugführung; FS=Fahrstreifen

Nach dem Abschluss des Fahrstreifenwechsels wird die Exzentrizität auf dem neuen Fahrstreifen wieder auf den Default „Fahrstreifenmitte“ eingestellt. Dieser Ablauf ist für den „Fahrstreifenwechsel rechts und links“, von der Richtung abgesehen, identisch.

Wird weder ein „Fahrstreifenwechsel rechts“ noch ein „Fahrstreifenwechsel links“ beauftragt, wird in der Programmablaufstruktur überprüft, ob ein Seitenstreifen existiert. Zusammen mit der Bedingung, dass kein weiterer Fahrstreifen rechts neben dem Ego-fahrstreifen vorhanden ist, sind die Voraussetzungen für das Manöver „rechts ranfahren“ gegeben, das dann vom System angeboten wird und ausgewählt werden kann. Wird dieses Manöver aktiviert, wird gleichzeitig ein Wechsel auf den Seitenstreifen durchgeführt und das Fahrzeug in den Stillstand verzögert, vorausgesetzt der Seitenstreifen ist frei. Ist dies nicht der Fall, wird analog zum Fahrstreifenwechsel ein Timer gestartet (der Übersichtlichkeit halber in Abb. 28 nicht dargestellt). Der Fahrer hat ebenfalls die Möglichkeit, das Manöver abubrechen und auf den Ursprungsfahrstreifen zu wechseln.

Aus dem Manöver „Straße folgen“ heraus kann der Fahrer Parametereinstellungen vornehmen, die im oberen Teil von Abb. 28 dargestellt sind. Über das Setzen der „Wunschgeschwindigkeit“ auf Null wird das Fahrzeug in den Stillstand verzögert.

3.5 Erstellung der Fahrmanöver im Fahrsimulator

Im Gegensatz zu der *Wizard of Oz*-Studie, mussten für die Evaluation der manöverbasierten Fahrzeugführung im Fahrsimulator die Fahrmanöver programmiert werden. Die Simulationssoftware *STISIM Drive* erlaubt durch ein Zusatzpaket (*OpenModule*) den Eingriff in die Fahrzeugdynamik, über das ein Verändern des Lenkradwinkels und der Brems- und Gaspedalstellung möglich ist. Der in *OpenModule* erstellte Quellcode wird in eine DLL (*Dynamic Link Library*) kompiliert, die in die Simulationssoftware eingebunden wird. Der Quellcode der eingebundenen DLL muss in *Visual Basic 6.0* erstellt werden.

Für die Erstellung der Fahrerassistenzfunktionen wurden zwei Regler, einer für die Längs- und einer für die Querverführung, in der DLL erstellt. Bei beiden Reglern handelt es sich um PD-Regler. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 29 gezeigt. Die Längsführung erfolgt im Fall des Vorhandenseins eines vorausfahrenden Fahrzeugs über den Abgleich der vom Fahrer eingestellten Zeitlücke (1,0 s bis 2,5 s nach Pasenau *et al.*, 2007). Ist der Ego-fahrstreifen frei, vergleicht der Längsführungsregler die vom Fahrer eingestellte Wunschgeschwindigkeit bzw. die aktuell zulässige Geschwindigkeit (der kleinere Wert wird ausgewählt) mit der Ist-Geschwindigkeit. Die Querverführung wird anhand der Querposition auf dem Fahrstreifen (in *STISIM Drive* ist dies der absolute Abstand zwischen der Mittellinie und dem Mittelpunkt des EgoFahrzeugs; Systems Technology, 2008) geregelt. Ausgehend vom Sollwert, der im Fall des Manövers „Straße folgen“ in der Mitte einer der Fahrstreifen liegt, wird im Regler, der aus einem Proportionalanteil und einem Dämpfungsanteil besteht, ein Lenkradwinkel (Stellgröße) generiert. In der Regelstrecke erfolgt durch diese Veränderung der Stellgröße eine Veränderung der Querposition, die vom Sensor (in diesem Fall stellt der Fahrsimulator die Daten zur Verfügung, so dass hier von einem idealen Sensor ausgegangen werden kann) erfasst und wieder mit dem Sollwert verglichen wird. Der Querverführungsregler hat im Unterschied zum Längsführungsregler eine Erweiterung. Ein Sollwerteinsteller (vgl. Abb. 29) sorgt bei großen Sollwertänderungen, die der Fahrer beispielsweise bei der Beauftragung eines „Fahrstreifenwechsels“ hervorruft, für ein besseres Verhalten des Gesamtsystems. Tölle (1996) schlägt bei der Auslegung eines Fahrstreifenwechsels eine Sigmoidfunktion der Form $f(x) = \frac{\varepsilon}{1 + e^{\eta x}}$ vor, wobei ε der Abstand zwischen zwei Fahrstreifenmitten und η die Steigung der Sigmoidfunktion ist.

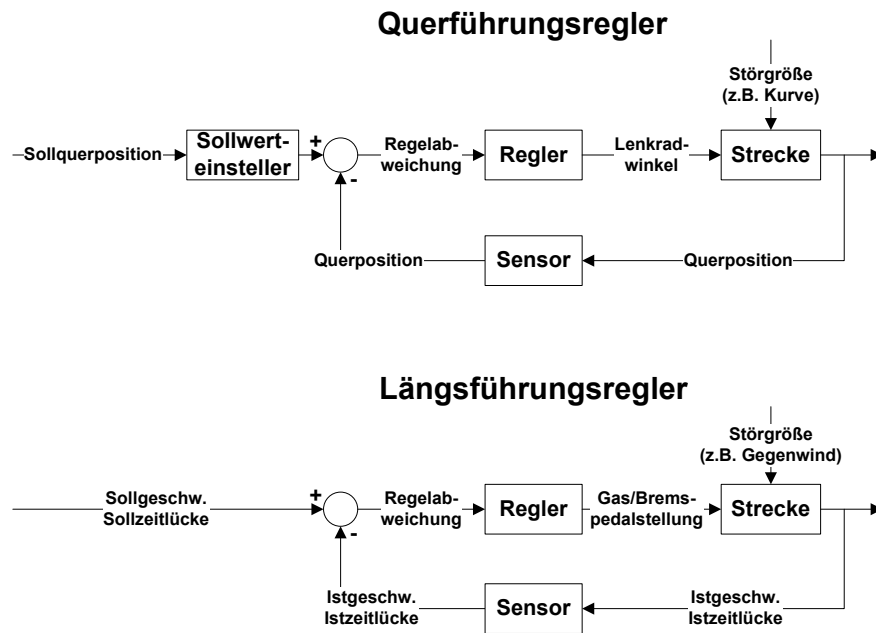


Abbildung 29: Blockschaltbild des Quer-/und Längsführungsreglers

Die Festlegung von η erfolgt ebenfalls nach Tölle (1996), der für eine Querbeschleunigung von $1,45 \frac{m}{s^2}$ und einer maximalen Lenkwinkelrate von $0,2 \frac{rad}{s}$ ein η von 0,28 ermittelt. Diese Funktion ist in der DLL hinterlegt und wird als Sollwertvorgabe beim Fahrstreifenwechsel verwendet.

Die Proportional- und Dämpfungsanteile sind systematisch variiert und im Fahrsimulator durch Testen von Referenzsituationen (z. B. „Fahrstreifenwechsel links“ in einer Rechtskurve) evaluiert worden. Für das Manöver „Straße folgen“ wurde für die Regelparameter zwischen der Folgefahrt (vorausfahrendes Fahrzeug vorhanden) und der Freifahrt unterschiedliche Reglereinstellungen für die Längsführung verwendet.

Bei der Querführung wurden für „Straße folgen“, „Fahrstreifenwechsel“ (keine Unterscheidung zwischen rechts und links bei den Regelparametern) und dem Abbruch eines „Fahrstreifenwechsel“ ebenfalls angepasste Regelparameter verwendet.

3.6 Manöverschnittstelle

Die Manöverschnittstelle ist nicht Fokus dieser Arbeit, sondern wurde in Forschungsarbeiten von Kauer *et al.* (2009b,a, 2010b) entwickelt. Allerdings ist die Manöverschnittstelle ein wesentliches Element der manöverbasierten Fahrzeugführung und kann daher für die Evaluation natürlich nicht ausgeschlossen werden. In diesem Kapitel werden daher kurz die Entwicklung und der für diese Arbeit zugrundeliegende Prototyp dargestellt. Nach Kauer *et al.* (2010b) sind die wichtigsten Anforderungen an die Manöverschnittstelle, dass (i) die Fahrereingaben zuverlässig und ohne Interpretation (wie bei einer Sprachsteuerung) des Systems übergeben werden müssen, dass (ii) die Eingabe des Fahrers schnell gehen muss (Kauer *et al.*, 2010b führt an, dass somit keine Menüstrukturen verwendet werden dürfen), dass (iii) der Fahrer über alle möglichen Manöver informiert werden soll und dass (iv) die zu entwickelnde Mensch-Maschine-Schnittstelle in ein heutiges Fahrzeug integrierbar sein muss.

Vor allem die Anforderung der adaptiven Anzeige von möglichen Fahrmanövern führte zur Auswahl eines Touchscreens, der mittig vor dem Fahrer positioniert wird. Herkömmliche Touchscreens haben gegenüber Knöpfen einige Nachteile. Vor allem die unzureichende taktile Rückmeldung einer Schaltflächenbetätigung im Finger sind hier anzuführen. Die somit fehlende Blindbedienbarkeit kann durch neue Entwicklungen im Bereich der Touchscreens bewerkstelligt werden, die sich aber noch im Prototypenstadium befinden und somit nicht für die Manöverschnittstelle in Frage kommen (ein Vergleich von Touchpads und Touchscreens mit variablen Oberflächenstrukturen kann Spies *et al.*, 2009 entnommen werden).

Eine taktile Rückmeldung einer Eingabe kann in direktem Zusammenhang mit der Anforderung der Zuverlässigkeit gesehen werden, da der Fahrer keine direkte Mitteilung bekommt, ob er ein Manöver aktiviert hat, wenn man von akustischen Rückmeldungen, die im Kraftfahrzeug mit Bedacht einzusetzen sind, absieht. Es ist durch die Touchscreenlösung möglich, ausgewählte Manöver optisch hervorzuheben, wie es im Softwareprototyp auch getan wurde. Dies kann der Fahrer allerdings erst erkennen, wenn er den Finger, mit dem die Betätigung erfolgte, von der Schaltfläche entfernt. Dafür muss er allerdings seinen Blick von der Straße wenden und verliert in manchen Situationen wichtige Zeit. Um diesen Nachteil auszugleichen, wurde ein taktilel Touchscreen *TouchSense® Demonstrator 8.4* von *Immersion* eingesetzt.

Dieser im Durchmesser 8.4 Zoll große Touchscreen verfügt über Aktuatoren, welche die Oberfläche des Displays schwingen lassen können. Durch diese Schwingung lässt sich für den Benutzer eine Art Tastendruck simulieren, und er bekommt eine Rückmeldung für die Betätigung. Der *TouchSense® Demonstrator 8.4* verfügt über einen Standard VGA-Anschluss sowie eine USB-Schnittstelle. Programmiert werden kann beispielsweise in *Visual Basic 2008*. Für diese Programmiersprache liefert *Immersion* in einem *System Developer Kit* Methoden für das Aufrufen von verschiedenen taktilen Rückmeldungen.

Über dieses Display werden dem Fahrzeug die Manöver übergeben. Teil des in dieser Arbeit vorgestellten Konzeptes ist der mögliche Wechsel zwischen Bahnführungseingaben, den Manövern und Parametern sowie Stabilisierungseingaben. Für Stabilisierungseingaben kommen, wie erwähnt, auch alternative Bedienelemente, wie Sidesticks in Betracht. Es soll für eine einfache Einführung aber auf Basis der konventionellen Bedienelemente (Lenkrad und Pedalerie) entwickelt werden. Die umgesetzte Gestaltungslösung, implementiert im Fahrsimulator, ist in Abb. 30 dargestellt. Abb. 31 zeigt den mit CAD realisierten Entwurf der Manöverschnittstelle.



Abbildung 30: Im Fahrsimulator implementierte Manöverschnittstelle

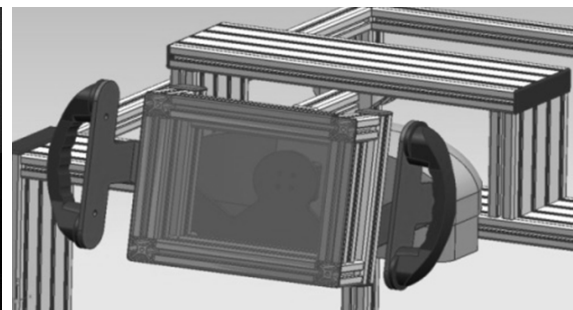


Abbildung 31: CAD-Entwurf der Manöverschnittstelle (Kauer *et al.*, 2010b)

Neben der Hardware muss ebenfalls eine Software für die Manöverschnittstelle erstellt werden. Die Erarbeitung des Softwarefrontends ist in Kauer *et al.* (2010b) dokumentiert. Es wird daher im Folgenden nur auf die Funktionsweise des Softwareinterfaces eingegangen, nicht aber auf den Gestaltungsprozess.

In Abb. 32 ist die Softwareoberfläche der Manöverschnittstelle dargestellt, die nicht nur für die Autobahn entwickelt wurde und daher einige Manöver mehr enthält, die man für Stadtszenarios benötigt. Die Manöver sind in der 3×3 -Matrix, die dunkel hinterlegt ist, dargestellt. Für die Autobahn wurden die Manöver in der Mitte der Matrix („Fahrstreifenwechsel links“, „Anfahren“, „Fahrstreifenwechsel rechts“) und das Manöver rechts unten („rechts ranfahren“) verwendet.

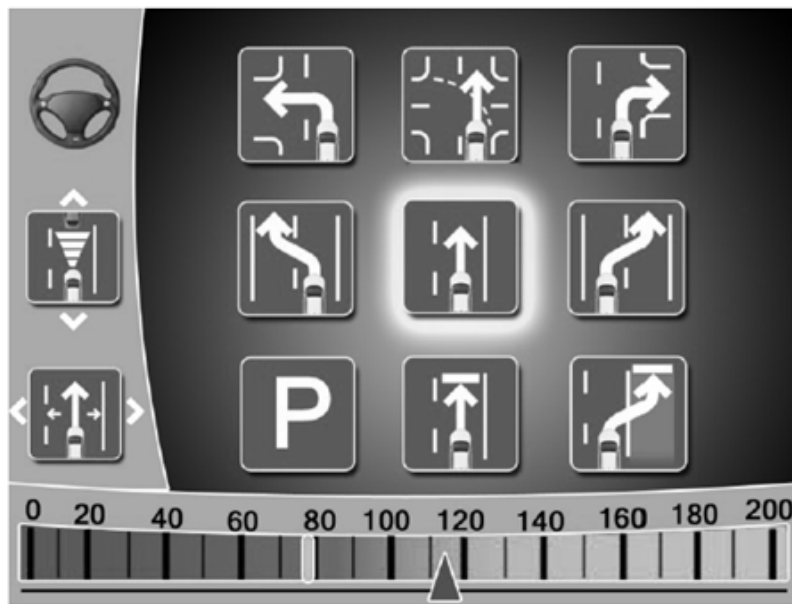


Abbildung 32: Softwareinterface der Manöverschnittstelle nach Kauer *et al.* (2010b)

Die Schaltfläche „Anfahren“ erscheint nur im Stillstand des Fahrzeugs und wird in Bewegung vom Manöver „Straße folgen“ ersetzt, mit dem auch eine Aktivierung des Systems möglich ist. Das Manöver, das gerade vom System durchgeführt wird, ist hell hinterlegt (in Abb. 32 ist dies „Straße folgen“ in der Mitte). Das Lenkradsymbol ganz oben links ist die Schaltfläche, um das manöverbasierte Fahrzeugführungskonzept zu deaktivieren und wieder in den manuellen Modus zurückzukehren. Die beiden Symbole darunter sind für eine in vier Stufen aufgeteilte Einstellmöglichkeit der Zeitlücke und die Wahl einer Exzentrizität von der Fahrstreifenmitte (jeweils zwei Stufen nach rechts und links).

Am unteren Rand ist ein Tachometer dargestellt. Die helle senkrechte Linie bei ca. $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ symbolisiert die aktuelle Geschwindigkeit, das dunkle Dreieck bei $115 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ zeigt die eingestellte Wunschgeschwindigkeit. Durch ein Drücken auf den Bandtacho kann die Wunschgeschwindigkeit verändert werden.

Zur Softwareentwicklung der Manöverschnittstelle gehört ebenfalls die Erstellung eines Head-Up-Displays. Am unteren Rand der Fahrsimulationsdarstellung wird das aktuell ausgeführte Manöver anhand der Icons, die auch für die Manöverschnittstelle verwendet wurden, angezeigt (vgl. Abb. 30). Ebenfalls ist im Head-Up-Display der Bandtacho dargestellt, der die aktuelle und die Wunschgeschwindigkeit anzeigt.

4 Überprüfung der manöverbasierten Fahrzeugführung in einer Fahrsimulatorstudie

In diesem Kapitel wird das vorgestellte Konzept der manöverbasierten Fahrzeugführung (vgl. Kapitel 3.4) mit der in den Kapiteln 3.5 und 3.6 erstellten Hard- und Software evaluiert. In Kapitel 4.1 wird das Untersuchungsziel und die daraus abgeleiteten übergeordneten Hypothesen gezeigt. Im Anschluss wird der Aufbau im Fahrsimulator dargestellt (vgl. Kapitel 4.2).

In Kapitel 4.3 wird das Versuchskonzept der Evaluation dargestellt, in dem neben den Messgrößen, die für die Versuche zur Verfügung standen und aus denen die übergeordneten Hypothesen aus Kapitel 4.1 in statistische Hypothesen detailliert wurden, auch das Versuchspersonenkollektiv, die Versuchsstrecke und der Versuchsablauf gezeigt werden.

In Kapitel 4.4 wird die Datenaufbereitung und die Auswertungsmethodik dargestellt, die im anschließenden Kapitel 4.5 verwendet wird, um die Daten auszuwerten. Die Auswertung ist in drei Unterkapitel aufgeteilt: Vor der Auswertung der Hypothesen (vgl. Kapitel 4.5.3) werden die Ergebnisse für die erfahrenen Fahrer (vgl. Kapitel 4.5.1) und Novizen (Kapitel 4.5.2) allgemein dargestellt.

Die Evaluation schließt mit einer Diskussion (Kapitel 4.6) der Versuche und deren Ergebnisse.

4.1 Untersuchungsziel und Hypothesen

Das Untersuchungsziel ist, die prinzipielle Machbarkeit einer manöverbasierten Fahrzeugführung zu prüfen. Wie in der Einleitung dargestellt (vgl. Kapitel 1), lässt sich dieses übergeordnete Ziel in Unterziele auftrennen, die in diesem Kapitel in den folgenden Absätzen anhand von übergeordneten Hypothesen formuliert werden sollen. Die Hypothesen leiten sich aus der Zielsetzung (vgl. Kapitel 1), aus den Chancen und Risiken des Kapitels 2.4, aus dem Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung aus Kapitel 3.1.3 und aus der Konzeption der manöverbasierten Fahrzeugführung ab. Die Hypothesen werden in diesem Kapitel zunächst allgemein formuliert. Die detaillierte Hypothesenbildung erfolgt erst nach einem Abgleich mit den Messgrößen, die für die Evaluation zur Verfügung standen.

Im Folgenden werden die übergeordneten Hypothesen aufgestellt, die sich an der Gliederung von Kapitel 2.4 orientiert. Lediglich Kapitel 2.4.3 zum sicherheitskritischen Stabilisierungsverhalten des Fahrers direkt nach einer Rückübernahme wird nicht weiter berücksichtigt, da die Manöverschnittstelle für eine verlässliche Evaluation nicht ausreicht. Die Hauptursache liegt in der fehlenden Bewegung des Lenkrads während der Manöverinteraktion begründet.

Zusätzlich werden die zwei Abschnitte „Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung“ und „Sicherheit“ berücksichtigt und den Chancen und Risiken vorangestellt. Abschließend wird der Lerneffekt sowie der Unterschied zwischen erfahrenen Fahrern und Novizen jeweils in einer allgemeinen Hypothese formuliert.

Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung Grundvoraussetzung einer Weiterentwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung und damit auch von *Conduct-by-Wire* ist, dass die Manöverführung für die Versuchspersonen ausführbar ist.

Ein Hinweis für eine gelungene Interaktion ist die Häufigkeit von Manöveraufträgen. Werden viele Manöver beauftragt und gibt es eine gleichmäßige Verteilung der Beauftragung über die Strecke und die Versuchspersonen, ist davon auszugehen, dass der Fahrer zumindest auf *Bahnführungsebene* im Regelkreis gehalten werden kann und die Interaktion verstanden hat. Die Hypothese zur „Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung“ lautet somit:

Hypothese In Anhand der Manöverbeauftragungen wird der Fahrer bei der manöverbasierten Fahrzeugführung zumindest auf *Bahnführungsebene* in der Fahraufgabe gehalten.

Sicherheit Die Manöverführung darf den Nutzer und andere Verkehrsteilnehmer nicht gefährden. Nur wenn keine zusätzlichen Risiken entstehen, darf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in der Art, wie sie in dieser Arbeit gezeigt wird, weiterentwickelt und für den öffentlichen Straßenverkehr vorbereitet werden. Die Hypothese zur Sicherheit lautet:

Hypothese S Die Sicherheit der Nutzer der manöverbasierten Fahrzeugführung wird im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung nicht verschlechtert.

Entlastung des Fahrers Ein weiteres Ziel ist die Entlastung des Fahrers. Dabei wird zunächst nicht in physische und psychische Entlastung unterteilt, da beide von Relevanz für die Manöversteuerung sind. Die Hypothese zu „Entlastung des Fahrers“ lautet:

Hypothese E Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt zu einer Entlastung des Fahrers.

Situation Awareness Ein Risiko bei der Automatisierung von Fahraufgaben ist ein Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe. Dieses Problem wurde in Kapitel 2.4.2 ausführlich unter dem Begriff *Situation Awareness* vorgestellt und wird für die Evaluation über folgende Hypothese evaluiert:

Hypothese SA Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der *Situation Awareness*.

Mode Awareness Neben dem Bewusstsein gegenüber der Fahrsituation (*Situation Awareness*) muss der Fahrer einer manöverbasierten Fahrzeugführung Kenntnis über den Systemzustand haben. Dies gilt insbesondere, wenn eine Rückübernahme durch den Fahrer nötig wird. In Kapitel 2.4.5 wurde dies diskutiert und wird mit folgender übergeordneten Hypothese evaluiert:

Hypothese MA Die Nutzer der manöverbasierten Fahrzeugführung haben ausreichende *Mode Awareness*, um in kritischen Situationen eine Rückübernahme in den manuellen Modus durchzuführen.

Gebrauchstauglichkeit der manöverbasierten Fahrzeugführung Für die Verwendung der Manöverführung ebenfalls zwingend notwendige Voraussetzung ist eine gute Gebrauchstauglichkeit des Systems. Dies wird in der Evaluation über folgende Hypothese untersucht:

Hypothese GT Die Gebrauchstauglichkeit der manöverbasierten Fahrzeugführung ist nicht schlechter als die der konventionellen Fahrzeugführung.

Risikohomöostase Wie Aschenbrenner & Biehl (1994) und Sagberg *et al.* (1997) zeigen, können Fahrerassistenzsysteme zu einer Steigerung der Risikobereitschaft (z. B. durch kleinere Zeitlücken zu vorausfahrenden Fahrzeugen) führen. Dieses Phänomen, beschrieben durch den Ansatz der Risikohomöostase von Wilde (1982), sollte bei der Interaktionsgestaltung und Funktionsfestlegung der manöverbasierten Fahrzeugführung möglichst unterbunden werden. Die Hypothese zur Risikohomöostase lautet:

Hypothese RH Eine Nutzung der manöverbasierten Fahrzeugführung erhöht das von den Fahrern eingegangene Risiko nicht.

Lerneffekt und „Bahnführung auf fertigkeitbasierter Ebene“ Eine aus dem Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung abzuleitende Hypothese fokussiert den Lerneffekt bei der Nutzung der neuen Interaktion. Damit verbunden ist ebenfalls das Ziel einer fertigkeitbasierten Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung. Abschließend kann diese Frage aufgrund fehlender Langzeituntersuchungen nicht beantwortet werden, es lassen sich aber Hypothesen hinsichtlich kurzfristiger Lerneffekte formulieren. Dabei wird angenommen, dass Lerneffekte langfristig zu einer fertigkeitbasierten Interaktion führen.

Hypothese LE Eine fertigkeitbasierte Interaktion auf *Bahnführungsebene* mit der manöverbasierten Fahrzeugführung ist möglich.

Unterschied der Bedienung der manöverbasierten Fahrzeugführung durch erfahrene Fahrer und Novizen Bei der Evaluation von neuen Fahrzeugführungskonzepten (z. B. Sidesticks nach Eckstein, 2001), die eine weitreichende Änderung der konventionellen Bedienung mit Lenkrad und Pedalen darstellen, ist es wichtig, nicht nur die Nutzergruppe zu untersuchen, die von einem schon bestehendem Konzept auf ein neues Konzept „umlernt“, sondern auch Nutzer, die keine Vorerfahrung besitzen, miteinzubeziehen. Dies wird in der Evaluation der manöverbasierten Fahrzeugführung über Fahranfänger (Novizen), die

noch nicht im Besitz eines gültigen Führerscheins sind und noch nicht mit Praxisfahrsstunden in der Fahrschule begonnen haben, gewährleistet. Die übergeordnete Hypothese bezieht sich auf Unterschiede in der Interaktion dieser beiden Nutzergruppen und wird wie folgt formuliert:

Hypothese NZ Bei der Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung besteht kein Unterschied zwischen den erfahrenen Fahrern und den Novizen.

4.2 Fahrsimulatorenbau

In Abb. 33 ist der Aufbau der manöverbasierten Fahrzeugführung im Fahrsimulator gezeigt. Die Geräte Nr. 1 bis Nr. 5 befinden sich auf dem Tisch des Versuchsleiters, der von dort die Simulation anhand des Simulations- und Touchscreenrechners (Nr. 2 und Nr. 4) starten und überwachen sowie alle relevanten Messungen starten kann (z. B. eine Videoaufnahme über einen Videomultiplexer [Nr. 1 und Nr. 3] oder die Blickbewegungsanalyse [Nr. 5]).

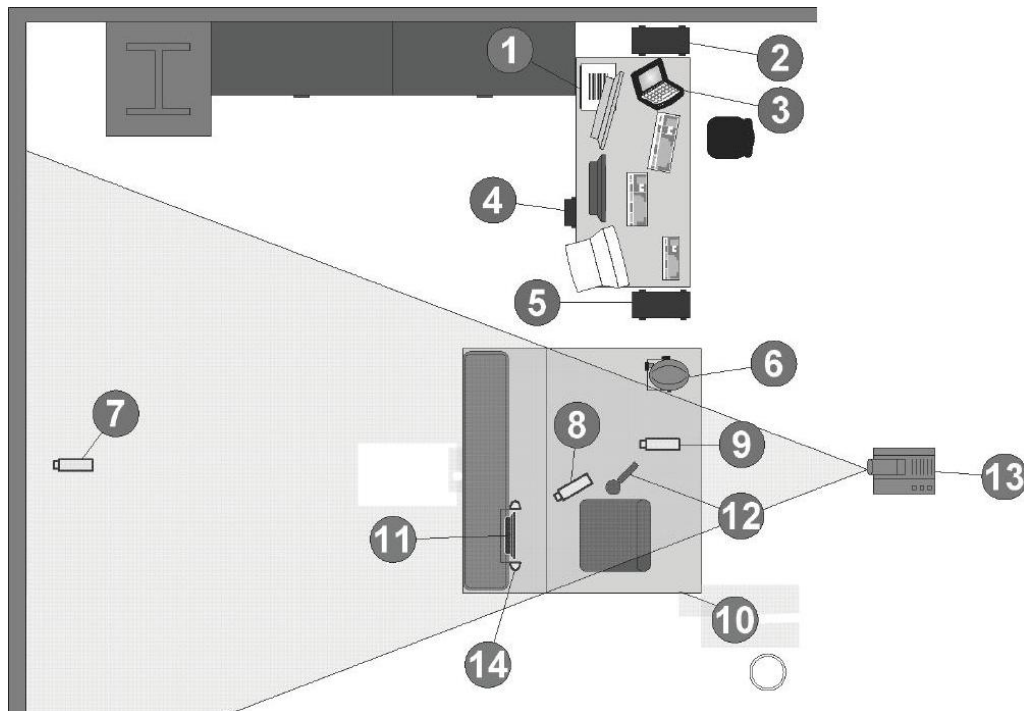


Abbildung 33: Versuchsaufbau des Fahrsimulators für die Versuche der manöverbasierten Fahrzeugführung; 1. Multiplexer und Audio-/Video- Grabber, 2. Fahrsimulationsrechner *STISIM Drive*, 3. digitale Aufnahme (Computer) des Videosignals des Multiplexers, 4. Rechner des Touchscreens, 5. Rechner der Blickbewegungsanalyse, 6. Blickbewegungshelm, 7. Videokamera für den Kilometerstand, 8. Videokamera für die Erfassung der Touchscreeneingaben der Manöverschnittstelle, 9. Videokamera für das Beamerbild, 10. Fahrzeug Mock-up, 11. taktiler Touchscreen der Manöverschnittstelle, 12. Mikrophon zur Aufzeichnung der Aussagen der Versuchspersonen, 13. Beamer, 14. Lenkrad der Manöverschnittstelle

Der Blickbewegungshelm, den die Versuchsperson während der Fahrsimulation trägt, ist auf dem Mock-up (Nr. 10) dargestellt. Nr. 7 bis Nr. 9 stellen Videokameras da, die mit dem Multiplexer (Nr. 1) zur zeitsynchronen Aufnahme verbunden sind. Nr. 11 (Touchscreen) und Nr. 14 (Lenkrad) sind die Bestandteile der Manöverschnittstelle. Das Fahrsimulatorbild wird über einen Beamer (Nr. 13) projiziert, die Kommentare der Versuchspersonen werden über ein Mikrofon aufgezeichnet, das ebenfalls mit dem Multiplexer (Nr. 1) verbunden ist.

4.3 Versuchsdesign

In diesem Kapitel wird das Versuchsdesign beschrieben. Nachdem in Kapitel 4.3.1 die Messgrößen, die für die Evaluation im Fahrsimulator zu Verfügung standen, vorgestellt wurden, werden die übergeordneten Hypothesen aus Kapitel 4.1 in statistische Hypothesen detailliert (vgl. Kapitel 4.3.2).

Im Anschluss wird das Probandenkollektiv, das für die Untersuchung akquiriert wurde, vorgestellt. Es handelt sich dabei um die schon erwähnten Gruppen der erfahrenen Fahrer (mit gültigem Führerschein) und die Novizen (ohne Führerschein).

In Kapitel 4.3.4 wird die Versuchstrecke vorgestellt, Kapitel 4.3.5 zeigt den zeitlichen Versuchsablauf.

4.3.1 Messgrößen für die Evaluation

Im Folgenden werden die Messgrößen, die für die Evaluation herangezogen werden können, dargestellt. Diese sind in die Abschnitte „Blickbewegungsanalyse“, „Fahrzeugdaten“, „Videoaufzeichnung“ und „subjektive Befragung durch Fragebögen“ unterteilt.

Blickbewegungsanalyse Während der Fahrsimulatorversuche wird die Blickbewegungsanalyse angewendet. Zum Einsatz kommt ein *iView*-Helm der Firma *SMI (SensoMotoric Instruments)*. Ziel ist es, die Blickbewegung des Fahrers während der Fahrt aufzuzeichnen. Aus den gewonnenen Informationen sollen bei der Auswertung Blickzuwendungshäufigkeiten und Blickzuwendungsdauern für definierte Zonen, die sogenannten *Areas of Interest* (AOI; z. B. „Rückspiegel“, „Touchscreen“, ...) analysiert werden.

Die Auswahl der AOI ist nicht fest vorgegeben, sondern ist abhängig vom Untersuchungsziel zu wählen (Rötting, 2001). Die Daten liegen in Form eines Umfeldvideos vor, das mit einem roten Kreis überlagert ist, der den aktuellen Fixationsort symbolisiert.

Fahrzeugdaten Während der Durchführung eines Fahrversuchs werden über die Fahrsimulatorsoftware *STISIM Drive* die Fahrzeugdaten mitgeschrieben. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt mit 50 Hz, wobei alle Daten pro Aufzeichnungszeitpunkt in eine Zeile geschrieben werden.

Tab. 8 zeigt alle aufgezeichneten Messwerte mit kurzer Beschreibung. Neben den üblichen Messgrößen, wie Geschwindigkeit, Längs- und Querschleunigung und der Querposition auf dem Fahrstreifen, sind für die Manöver- und Parameterinteraktion vor allem Nr. 17 und Nr. 18 wichtig. Hier werden die Informationen, die der Simulationsrechner mit dem Touchscreen austauscht, direkt gespeichert. Bei der Auswertung kann hier die Betätigung einzelner Schaltflächen auf dem Touchscreen in Abhängigkeit der anderen Größen betrachtet werden, was vor allem für die zurückgelegte Strecke (Nr. 4 distance

[m]) und die vergangene Zeit seit Beginn der Versuchsfahrt (Nr. 1 time [s]) interessante Auswertungsmöglichkeiten bietet.

- | | |
|---|---|
| 1. time [s] vergangene Zeit seit Beginn der Versuchsfahrt | 11. tInputCount [Int] Gaspedalstellung (Integerwert aus Fahrsimulation) |
| 2. distanceX [m] zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs vom Startpunkt der Versuchsstrecke in x-Richtung | 12. bInputCount [Int] Bremspedalstellung (Integerwert aus Fahrsimulation) |
| 3. distanceY [m] zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs vom Startpunkt der Versuchsstrecke in y-Richtung | 13. swInputCount [Int] Lenkradeinschlag (Integerwert aus Fahrsimulation) |
| 4. distance [m] zurückgelegte Strecke des Fahrzeugs vom Startpunkt der Versuchsstrecke entlang der Fahrbahnmarkierung des linken Fahrstreifens | 14. sw [°] Lenkwinkel |
| 5. yLanePos [m] Lateralabstand des Fahrzeugs zur linken Fahrbahnmarkierung des linken Fahrstreifens | 15. swRate [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$] Lenkwinkelgeschwindigkeit |
| 6. speed [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$] Istgeschwindigkeit des Fahrzeugs | 16. timeGap [s] Zeitlücke zwischen dem Egofahrzeug und dem vorausfahrenden Fahrzeug |
| 7. a_x [$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$] Longitudinalbeschleunigung | 17. displayReceive [Int] beschreibt 15 Werte die der Touchscreenrechner vom Simulationsrechner empfängt (diese Werte werden bei der Auswertung für die Manövereingaben verwendet). |
| 8. a_y [$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$] Lateralbeschleunigung | 18. displaySent [Int] beschreibt 14 Werte die der Simulationsrechner vom Touchscreenrechner empfängt (diese Werte werden bei der Auswertung für die Manövereingaben verwendet). |
| 9. yaw [°] Gierwinkel | |
| 10. yawRate [$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$] Gierrate (Giergeschwindigkeit) | |

Tabelle 8: Fahrzeugdaten, die vom Fahrsimulator aufgezeichnet wurden; Int = Integerwert (16 bit)

Videoaufzeichnung Zur Auswertung und Dokumentation der Probandenversuche wurden die Fahrten als digitales Video mitgeschnitten, so dass im Nachhinein Situationen nachvollziehbar sind. Dazu eignet sich prinzipiell das in diesem Kapitel beschriebene Blickbewegungssystem. Problematisch ist an dem Blickbewegungsvideo jedoch, dass kein Zeitstempel vorhanden ist, mit dem man die Videos im Nachhinein mit den Fahrzeugdaten synchronisieren könnte. Der Kilometerstand am unteren Rand der Projektionsfläche ist über dieses Video schwer ablesbar. Aus diesem Grund wurde mit Hilfe von drei Kameras, die auf Stativen rund um den Versuchsaufbau angeordnet waren, weitere Informationen gesammelt. Eine Kamera filmte das Beamerbild, um die aktuelle Verkehrssituation zu erfassen. Dabei wurde auch das Head-Up-Display aufgezeichnet. Eine zweite Kamera ist auf die Manöverschnittstelle gerichtet und erfasst die Eingaben durch den Probanden. Mit der dritten Kamera wird der Kilometerstand am unteren Rand der Projektionsfläche gefilmt, mit der eine spätere Synchronisierung mit den Fahrzeugdaten möglich ist. Alle drei Videosignale werden in den Multiplexer eingespielt und zu einem Video zusammengefasst. Mit einem Mikrofon, das neben dem Probanden positioniert wird, können dessen Kommentare dokumentiert werden.

Subjektive Befragung anhand von Fragebögen Durch die Fragebögen werden die Subjektivurteile der Versuchspersonen ermittelt. Dabei existieren sowohl standardisierte Fragebögen (AttrakDiff, SUS und NASA TLX ZEIS) als auch speziell an den Fahrversuch angepasste Fragebögen. Über den gesamten Versuchszeitraum von 3 Std. ist jeder Proband mehrmals aufgefordert worden, einen oder mehrere dieser Bögen auszufüllen. Der NASA TLX ZEIS ist beispielsweise nach jeder Versuchsstrecke ausgefüllt worden, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Szenarios zu ermöglichen. Alle Fragebögen sind von den Probanden anonym ausgefüllt und für die Datenauswertung personenweise abgelegt worden. Insgesamt wurden 8 verschiedene Fragebögen verwendet, die im Folgenden erklärt werden.

Ein *allgemeiner Fragebogen* gliedert sich in drei Gebiete. Im ersten Bereich werden allgemeine Informationen zur Person erfasst (z. B. Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung). Das zweite Fragegebiet beschäftigt sich mit den bisherigen Erfahrungen der Probanden mit Fahrerassistenzsystemen. Im Bereich drei wird die Erfahrung mit Fahrsimulatoren abgefragt.

Der *Fragebogen zur Systembedienung* dient dazu, herauszufinden, ob der Proband die Bedienung der manöverbasierten Fahrzeugführung richtig verstanden hat (vgl. Anhang C). Es werden gezielt Situationen und mögliche Handlungsalternativen abgefragt. Den Versuchspersonen werden mehrere Antwortmöglichkeiten im Multiple-Choice-Format vorgelegt. Die Anzahl der richtigen Antworten pro Frage ist dabei den Versuchsteilnehmern nicht bekannt. Der Fragebogen wird ausgegeben, nachdem der Fahrer bereits beide Strecken mit der manöverbasierten Fahrzeugführung gefahren ist. Es werden sowohl Standardsituationen („Was passiert, wenn Sie bei aktiviertem System auf die Bremse treten?“) als auch kritische Situationen abgefragt („Was passiert, wenn vor Ihnen ein Lkw fährt, wobei die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs höher ist als die des Lkws? Sie nähern sich dem Lkw.“).

Der *Fragebogen zum Bedien- und Anzeigekonzept* wird nach Abschluss der manöverbasierten Fahrten ausgegeben. Dabei wird die Darstellung der Icons überprüft und abgefragt, ob die Icons noch den Manövern zugeordnet werden können. Im Zuge dessen wird auch das Head-Up-Display bewertet.

Dieser *Manöverfragebogen* fragt ausschließlich die Fahrmanöver ab. Zu Beginn soll festgestellt werden, ob dem Probanden Manöver gefehlt haben oder ob bestimmte Manöver überflüssig waren. Im Anschluss werden die einzelnen Manöver beurteilt, um Aussagen über deren Eignung treffen zu können. Zum Ende des Fragebogens wird noch eine Befragung über die eigentliche Kooperation und die Zuverlässigkeit der manöverbasierten Fahrzeugführung durchgeführt. Mit Hilfe des *Fragenbogens zur Akzeptanz* soll die Akzeptanz der Probanden gegenüber der manöverbasierten Fahrzeugführung überprüft werden. Dieser Fragebogen wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da die Akzeptanz in gesonderten Evaluationen ermittelt wird (vgl. Kauer *et al.*, 2010a).

Des Weiteren wurden die validierten Fragebögen *AttrakDiff* nach Hassenzahl *et al.* (2003), der durch seine Fokussierung auf hedonische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion ebenfalls dem gesonderten Forschungsthema der Akzeptanz von hochautomatisierten Fahrzeugen zuzurechnen ist und daher nicht weiter betrachtet wird, und die *System Usability Scale* (SUS) nach Brooke (1996) verwendet.

Der SUS eignet sich besonders, um einen schnellen Eindruck über die Gebrauchstauglichkeit zu bekommen. Der Fragebogen besteht aus 10 Fragen, wobei der Proband die Möglichkeit besitzt, in einer 5-Punkte-Likert-Skala (von „trifft überhaupt nicht zu“ bis „trifft absolut zu“) seine Meinung zu äußern. Der SUS-Wert ergibt sich anschließend an-

hand einer Berechnungsformel und liegt in einem Bereich zwischen 0 und 100. Der Wert „0“ würde einem Produkt zugeschrieben, das vollkommen gebrauchsuntauglich ist, „100“ einem Produkt, mit dem der Proband sehr zufrieden war (Brooke, 1996).

Der *NASA Task Load Index* (NASA TLX) nach Hart & Staveland (1988), erweitert um die ZEIS-Skala nach Käßler & Pitrella (1988) (vgl. auch Rohmert, 1994 und Käßler & Godthelp, 1994), wurde nach jeder Fahrsimulatorfahrt ausgefüllt. Die ZEIS-Skala ist in zwei Ebenen aufgebaut. In der ersten Ebene hat der Proband die Möglichkeit, eine grobe Entscheidung zu einer Fragestellung zu treffen (z. B. niedrig, mittel und hoch). Anschließend fächert sich die Skala noch einmal auf, und man kann sein Meinungsbild noch feiner gestalten.

Als Themengebiete behandelt werden die einwirkenden „Geistigen Anforderungen“, „Körperlichen Anforderungen“ und „Zeitlichen Anforderungen“. Außerdem wird der Proband gefragt, wie hoch die „Anstrengung“ war, wie er mit seinen erzielten Leistungen („Aufgabenerfüllung“) zufrieden war und welche „Frustration“ er bei der Ausübung der Aufgabe erlebt hat (Hart & Staveland, 1988). Die deutschen Begriffe sind nach (Schlick *et al.*, 2010, S. 416) gewählt worden.

4.3.2 Detaillierung der Hypothesen

Die Auswertung im Hinblick auf die Hypothesen aus Kapitel 4.1 wird an einigen Stellen deskriptiv erfolgen, da nicht zu allen Messgrößen statistische Untersuchungen durchgeführt werden können. Die detaillierten Hypothesen leiten sich aus den übergeordneten Hypothesen aus Kapitel 4.1 ab, sind mit den verwendeten Messgrößen für die Evaluierung (vgl. Kapitel 4.3.1) abgeglichen und werden in Kapitel 4.5 statistisch evaluiert. Im Folgenden wird für den Mittelwert die Nomenklatur μ , für die Standardabweichung die Nomenklatur σ verwendet.

Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung Die Interaktion wird zum Teil deskriptiv über die Anzahl der Manöver, die beauftragt wurden, beschrieben. Die übergeordnete Hypothese hinsichtlich der Interaktion (der Fahrer wird durch die Manöverinteraktion zumindest auf *Bahnführungsebene* im Regelkreis gehalten) lässt sich ohne eine Bestimmung der Anzahl an Manövern, die für eine ausreichende Einbeziehung des Fahrers in die Fahraufgabe nötig sind, nicht abschätzen. Daher wird angenommen, dass die Anzahl an Manövern, die bei konventioneller Fahrzeugführung durchgeführt werden, ausreicht, um den Fahrer auf *Bahnführungsebene* im Regelkreis zu halten.

Eine Analyse der Manöverhäufigkeiten kann anhand der expliziten Manöver erfolgen. Da die Probanden das Manöver „rechts ranfahren“ nur an einer Stelle in der Fahrsimulation beauftragen können und sie zudem dazu aufgefordert werden, dieses Manöver zu aktivieren, wird an dieser Stelle auf die Anzahl an „Fahrstreifenwechseln“, die tatsächlich durchgeführt wurden, fokussiert.

Hypothese In01 Die Anzahl der durchgeführten Fahrstreifenwechsel (FSW) im Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung und der konventionellen Fahrzeugführung ist gleich.

$$H_0 : \mu_{\text{Anzahl FSW (Manöver)}} = \mu_{\text{Anzahl FSW (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Anzahl FSW (Manöver)}} \neq \mu_{\text{Anzahl FSW (Konventionell)}}$$

Sicherheit Die Einführung der manöverbasierten Fahrzeugführung soll die Fahrzeugführung zumindest nicht unsicherer machen. Die Sicherheit wird zum einen über die Anzahl der Unfälle, die in den Baustelleneinfahrten (vgl. Kapitel 4.3.4) erfolgten, evaluiert (Hypothese S01). Durch die Programmierung der Strecke ist bekannt, an welchen Stellen sich Baustellenelemente befunden haben. Diese werden mit der Position des Egofahrzeugs verglichen. Zum anderen wird die für die Sicherheit oft herangezogene Kenngröße der Zeitlücke für Hypothese S02 herangezogen (vgl. Abendroth *et al.*, 2011).

Hypothese S01 Es besteht kein Unterschied in der Häufigkeit von Unfällen zwischen der manöverbasierten Fahrzeugführung und der konventionellen Fahrzeugführung in der Situation der Baustelleneinfahrt.

$$H_0 : \mu_{\text{Unfälle (Manöver)}} = \mu_{\text{Unfälle (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Unfälle (Manöver)}} \neq \mu_{\text{Unfälle (Konventionell)}}$$

Hypothese S02 Die manöverbasierte Fahrzeugführung hat im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung keinen Einfluss auf die Zeitdauer, die Versuchspersonen unterhalb einer Zeitlücke von 0,5 s fahren.

$$H_0 : \mu_{\text{Dauer Zeitlücke} < 0,5 \text{ s (Manöver)}} = \mu_{\text{Dauer Zeitlücke} < 0,5 \text{ s (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Dauer Zeitlücke} < 0,5 \text{ s (Manöver)}} \neq \mu_{\text{Dauer Zeitlücke} < 0,5 \text{ s (Konventionell)}}$$

Entlastung des Fahrers Die Entlastung des Fahrers wird zunächst subjektiv mit einer direkten Frage im Fragebogen ermittelt (Hypothese E01). Die Frage ist bipolar konzipiert. Das bedeutet, dass weder eine Entlastung, noch eine Belastung durch ein Kreuzen der Mitte der bei dieser Frage verwendeten Skala (Zahlenwert = 3) codiert wird. Im Anschluss werden die Skalen „Körperliche Anforderungen“, „geistige Anforderungen“, „Anstrengung“ und „Frustration“ des NASA-TLX ZEIS evaluiert (Hypothesen E02-E05). Wie im Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung in Kapitel 3.1.3 dargestellt, soll der Fahrer auf *Stabilisierungsebene* entlastet werden. Die Führer eines Fahrzeugs nutzen für die Regelung des Fahrzeugs die Fahrbahnbegrenzungen und Fahrstreifenmarkierungen (Gordan, 1966; Land & Lee, 1994). Möchte man den Fahrer also auf *Stabilisierungsebene* entlasten, müssen auch die Blickzuwendungshäufigkeit und Blickzuwendungsdauer zu den Fahrstreifenmarkierungen sinken. Dies wird in Hypothese E06 und E07 überprüft.

Hypothese E01 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der subjektiv bewerteten Belastung.

$$H_0 : \mu_{\text{Belastung}} = 3$$

$$H_1 : \mu_{\text{Belastung}} \neq 3$$

Hypothese E02 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der subjektiv empfundenen „Geistigen Anforderung“.

$$H_0 : \mu_{\text{TLX Geistige Anforderung (Manöver)}} = \mu_{\text{TLX Geistige Anforderung (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{TLX Geistige Anforderung (Manöver)}} \neq \mu_{\text{TLX Geistige Anforderung (Konventionell)}}$$

Hypothese E03 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der subjektiv empfundenen „Körperlichen Anforderung“.

$$H_0 : \mu_{TLX \text{ Körperliche Anforderung (Manöver)}} = \mu_{TLX \text{ Körperliche Anforderung (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{TLX \text{ Körperliche Anforderung (Manöver)}} \neq \mu_{TLX \text{ Körperliche Anforderung (Konventionell)}}$$

Hypothese E04 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der „Anstrengung“.

$$H_0 : \mu_{TLX \text{ Anstrengung (Manöver)}} = \mu_{TLX \text{ Anstrengung (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{TLX \text{ Anstrengung (Manöver)}} \neq \mu_{TLX \text{ Anstrengung (Konventionell)}}$$

Hypothese E05 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der „Frustration“ der Fahrer.

$$H_0 : \mu_{TLX \text{ Frustration (Manöver)}} = \mu_{TLX \text{ Frustration (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{TLX \text{ Frustration (Manöver)}} \neq \mu_{TLX \text{ Frustration (Konventionell)}}$$

Hypothese E06 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der Blickzuwendungsdauer zu den Fahrstreifenmarkierungen (Einfluss auf die Stabilisierungsaufgaben).

$$H_0 : \mu_{Blickdauer \text{ FSM (Manöver)}} = \mu_{Blickdauer \text{ FSM (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{Blickdauer \text{ FSM (Manöver)}} \neq \mu_{Blickdauer \text{ FSM (Konventionell)}}$$

Hypothese E07 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der Blickzuwendungshäufigkeit zu den Fahrstreifenmarkierungen (Einfluss auf die Stabilisierungsaufgaben).

$$H_0 : \mu_{Blickhäufigkeit \text{ FSM (Manöver)}} = \mu_{Blickhäufigkeit \text{ FSM (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{Blickhäufigkeit \text{ FSM (Manöver)}} \neq \mu_{Blickhäufigkeit \text{ FSM (Konventionell)}}$$

Situation Awareness Die *Situation Awareness* wird üblicherweise anhand der SAGAT-Methode erhoben (Endsley, 1988). Dabei wird das Simulationsbild „eingefroren“, unkenntlich gemacht, und im Anschluss werden spezifische Fragen an den Probanden gestellt. Dies ist anhand der *STISIM*-Simulation nicht möglich gewesen. Prinzipiell kann man einen Simulationslauf pausieren, jedoch nicht die in *OpenModul* erstellte Programmierung. So fahren beispielsweise die anderen Verkehrsteilnehmer trotz der Pausierung weiter.

Mit Hilfe der Blickbewegungsanalyse ist die *Situation Awareness Level 1* erfassbar (Smolensky, 1993), die die Wahrnehmung der situationsrelevanten Informationen beschreibt. Das Verstehen dieser Information (*Situation Awareness Level 2*) und die Prädiktion dieses Verständnisses auf die nahe Zukunft kann mit der Blickbewegungsanalyse nicht erfasst werden. Da die meisten Fehler jedoch auf dem Level 1 begangen werden, wird in diesen Versuchen nur dieses Level betrachtet (Endsley, 1999).

Hypothese SA01 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der Blickzuwendungshäufigkeit zum Rückspiegels.

$$H_0 : \mu_{Blickhäufigkeit \text{ Rückspiegel (Manöver)}} = \mu_{Blickhäufigkeit \text{ Rückspiegel (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{Blickhäufigkeit \text{ Rückspiegel (Manöver)}} \neq \mu_{Blickhäufigkeit \text{ Rückspiegel (Konventionell)}}$$

Hypothese SA02 Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Reduktion der Blickzuwendungsdauer auf die Straße (inkl. der sich darauf befindlichen Elemente)

$$H_0 : \mu_{\text{Blickdauer Straße (Manöver)}} = \mu_{\text{Blickdauer Straße (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Blickdauer Straße (Manöver)}} \neq \mu_{\text{Blickdauer Straße (Konventionell)}}$$

Mode Awareness Die Methodenentwicklung in Bereich der *Mode Awareness* ist nicht in dem Maße detailliert, wie es bei der *Situation Awareness* der Fall ist. Es müssen daher neue Kennwerte definiert werden. Neben dem Fragebogen zum Systemverständnis (vgl. Kapitel 4.3.1), wurden daher Systemausfälle simuliert (vgl. Kapitel 4.3.4). Ausgehend von der 2-*Second-Rule* (vgl. z. B. Shinar, 2007) wird untersucht, ob die Versuchspersonen innerhalb von 2 Sekunden die Kontrolle über das Fahrzeug zurückerlangen können (Hypothese MA01).

Hypothese MA01 Die Zeitdauer der Rückübernahme des Systems in einer kritischen Situation ist kleiner 2 s.

$$H_0 : \mu_{\text{Dauer der Rückübernahme}} < 2 \text{ s}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Dauer der Rückübernahme}} \geq 2 \text{ s}$$

Gebrauchstauglichkeit der manöverbasierten Fahrzeugführung Insbesondere bei der Entwicklung von Systemen für Personenkraftwagen ist die Gebrauchstauglichkeit von besonderem Interesse, da fast alle Nutzergruppen mit den Systemen in Berührung kommen können, wie beispielsweise beim ESP oder in Japan und Nordamerika der Tempomat. Daher wird auch für diesen ersten Prototypen eine Evaluierung der Gebrauchstauglichkeit (exklusive der Nutzungsfreude) über die *System Usability Scale* (SUS) nach Brooke (1996) vorgenommen.

Hypothese GT01 Die subjektiv empfundene Gebrauchstauglichkeit des manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes unterscheidet sich nicht von der Gebrauchstauglichkeit der konventionellen Fahrzeugführung.

$$H_0 : \mu_{\text{SUS (Manöver)}} = \mu_{\text{SUS (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{SUS (Manöver)}} \neq \mu_{\text{SUS (Konventionell)}}$$

Risikohomöostase Fahrerassistenzsysteme, die einen Sicherheitsgewinn für den Fahrer bewirken, können zu einem risikoreicheren Fahrverhalten führen (Aschenbrenner & Biehl, 1994; Sagberg *et al.*, 1997). In Kapitel 2.4.4 ist dieser Effekt der Risikohomöostase nach Wilde (1982) vorgestellt worden und wird mit den Kennwerten „Zeitlücke zum Vorfahrenden“ (Hypothese RH2) und der Geschwindigkeitsreduktion in der Situation „Nebel“ (Hypothese RH01) evaluiert.

Hypothese RH01 Bei der manöverbasierten Fahrzeugführung wird in Nebelsituationen die gleiche Fahrgeschwindigkeit gewählt wie bei konventioneller Fahrzeugführung.

$$H_0 : \mu_{\text{Geschwindigkeit Nebel (Manöver)}} = \mu_{\text{Geschwindigkeit Nebel (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Geschwindigkeit Nebel (Manöver)}} \neq \mu_{\text{Geschwindigkeit Nebel (Konventionell)}}$$

Hypothese RH02 Der Fahrer wählt sowohl bei der manöverbasierten Fahrzeugführung als auch bei der konventionellen Fahrzeugführung die gleiche Zeitlücke (bei einer Geschwindigkeit über $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und einer Zeitlücke von $< 5 \text{ s}$).

$$H_0 : \mu_{\text{Zeitlücke (Manöver)}} = \mu_{\text{Zeitlücke (Konventionell)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Zeitlücke (Manöver)}} \neq \mu_{\text{Zeitlücke (Konventionell)}}$$

Lerneffekte und „Bahnführung auf fertigkeitstbasierter Ebene“ Die Untersuchung eines Lerneffektes (und damit auch eines Elements zur Erreichung des Ziels einer Bahnführung auf fertigkeitstbasierter Ebene) bedarf einiger Versuchszeit, so dass in dieser Arbeit auf kurzfristige Lerneffekte fokussiert werden muss. In die Auswertung wird die Hypothese LE01 eingeschlossen, die eine Veränderung der Blickdauer zum Touchscreen entlang der Strecke evaluiert. Darüber hinaus wird untersucht, ob es einen Lerneffekt hinsichtlich des Systemverhaltens bei der Sondersituation der Baustelleneinfahrt gibt (vgl. Kapitel 4.3.4). Die Anzahl der Unfälle bei der Eingewöhnungsfahrt wird mit den Unfällen im Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung verglichen (Hypothese LE02).

Hypothese LE01 Die Blickzuwendungsdauer zum Touchscreen ändert sich über die zurückgelegten Streckenelemente 0–15 km, 16–30 km, 31–45 km, 46–60 km nicht.

$$H_0 : \mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (0–15 km)}} = \mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (16–30 km)}} =$$

$$\mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (31–45 km)}} = \mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (46–60 km)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (0–15 km)}} \neq \mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (16–30 km)}} \neq$$

$$\mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (31–45 km)}} \neq \mu_{\text{Blickdauer Touchscreen (46–60 km)}}$$

Hypothese LE02 Die Anzahl der Unfälle in der Einfahrt zu Baustellen unterscheidet sich nicht zwischen der Eingewöhnungsfahrt (mit der manöverbasierten Fahrzeugführung) und dem Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung.

$$H_0 : \mu_{\text{Unfälle (Eingewöhnung)}} = \mu_{\text{Unfälle (Manöver)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Unfälle (Eingewöhnung)}} \neq \mu_{\text{Unfälle (Manöver)}}$$

Unterschiede in der Fahrzeugführung bei erfahrenen Fahrern und Novizen Unterschiede zwischen der Gruppe der erfahrenen Fahrer und der Gruppe der Novizen werden statistisch hinsichtlich der Manöver- (Hypothese NZ01) und Parameterinteraktionshäufigkeit (Hypothese NZ02) evaluiert.

Hypothese NZ01 Die Anzahl an beauftragten Manövern pro Versuchsperson der Gruppe der erfahrenen Fahrer ist gleich der Anzahl an beauftragten Manövern pro Versuchsperson der Novizen.

$$H_0 : \mu_{\text{Anzahl Manöver (Erfahrene)}} = \mu_{\text{Anzahl Manöver (Novizen)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Anzahl Manöver (Erfahrene)}} \neq \mu_{\text{Anzahl Manöver (Novizen)}}$$

Hypothese NZ02 Die Anzahl an Parameteränderungen pro Versuchsperson der Gruppe der erfahrenen Fahrer ist gleich der Anzahl der Parameteränderungen pro Versuchsperson der Novizen.

$$H_0 : \mu_{\text{Anzahl Parameter (Erfahrene)}} = \mu_{\text{Anzahl Parameter (Novizen)}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Anzahl Parameter (Erfahrene)}} \neq \mu_{\text{Anzahl Parameter (Novizen)}}$$

4.3.3 Probandenkollektiv

Der Versuchsaufbau wurde in zwei Versuchsreihen verwendet, die sich durch das Versuchspersonenkollektiv unterscheiden. Die Hauptversuchsreihe mit den erfahrenen Fahrern wurde mit insgesamt 44 Versuchspersonen durchgeführt, wobei 3 Probanden aufgrund von *Simulation Sickness* die Versuche nicht bis zu Ende fahren konnten und daher aus der Auswertung ausgeschlossen wurden. Die 41 restlichen Versuchspersonen waren zwischen 19 und 53 Jahren alt, das durchschnittliche Alter lag bei 28,27 Jahren ($\sigma = 9,82$ Jahre). Es haben 32 Männer und 9 Frauen an den Versuchen teilgenommen. Die Fahrerfahrung ist insgesamt als hoch einzustufen, da 36 Versuchspersonen mindestens mehrmals pro Woche ein Fahrzeug führen und die restlichen fünf zumindest mehrmals pro Monat. Die Versuchspersonen hatten kaum Erfahrung mit Fahrerassistenzsystemen. Lediglich der Tempomat war den Versuchspersonen durchweg bekannt. LKAS, ACC und Totwinkelwarner waren etwa der Hälfte der Versuchspersonen gar nicht bekannt.

In der Nebenversuchsreihe mit Novizen kamen 15 Versuchspersonen zum Einsatz. Die Novizen waren zum Zeitpunkt der Versuche nicht im Besitz eines Führerscheins und waren zwischen 15 und 19 Jahren alt. Das durchschnittliche Alter lag bei 17,21 Jahren ($\sigma = 0,98$). Die Geschlechterverteilung ist hier annähernd ausgeglichen, mit 7 Frauen und 8 Männern. Die Novizen verfügen über keine Fahrerfahrung mit Pkws, wenige waren im Besitz eines Mofaführerscheins oder hatten mit Theoriestunden in einer Fahrschule begonnen.

Den Novizen waren Fahrerassistenzsysteme besser bekannt (etwa zwei Drittel der Versuchspersonen kannten die Fahrerassistenzsysteme LKAS, ACC und Totwinkelwarner).

4.3.4 Versuchsstrecke

Bei der Auswahl einer geeigneten Versuchsstrecke sollte auf das Vorkommen möglichst vieler realitätsnaher Fahrsituationen geachtet werden. Eine fiktive Strecke läuft oftmals Gefahr, zu einer Aneinanderreihung von kurzen Testabschnitten zu werden, die das Gefühl, sich in einer Simulation zu bewegen, beim Fahrer verstärkt. Um diesem Problem aus dem Wege zu gehen, wurde beschlossen, eine real existierende Strecke in der Simulationsumgebung abzubilden, soweit dies mit dem verwendeten Simulationswerkzeug *STISIM Drive* möglich ist.

Ausgewählt wurde ein ca. 120 km langes Streckenstück (vgl. Abb. 34) vom Autobahndreieck Darmstadt über Frankfurt nach Helmstadt (bei Würzburg). Die Strecke verläuft von Darmstadt auf der A5 in Richtung Norden, zweigt am Frankfurter Kreuz auf die A3 Richtung Würzburg ab und endet kurz vor Würzburg/Kist an der Ausfahrt 67 Helmstadt. Der Grund für die Wahl dieses Streckenabschnittes liegt im geographischen Verlauf der beiden Autobahnen. Die A5 läuft mit vier Richtungsfahrstreifen an Darmstadt vorbei, wobei bis zum Frankfurter Kreuz nur wenig Kurven vorkommen. Hier hat der Proband die Möglichkeit, sich mit der Funktion des Systems auseinanderzusetzen und die einzelnen Manöver zu trainieren. Am Frankfurter Kreuz verläuft dann die Abzweigung mit zwei Fahrstreifen auf die A3, die größtenteils zwei oder drei Fahrstreifen besitzt und die eigentliche Teststrecke bildet. Der Streckenverlauf wird durch viele Kurven anspruchsvoller, und das Höhenprofil lässt die Modellierung von einigen Bodenerhebungen zu.

Der Streckenverlauf wird aus einer Auflistung von Geraden und Kurven zusammengestellt, wobei jede Kurve wieder ein Ein- und Auslaufstück (Klothoiden) besitzt. Somit müssen für die Programmierung einer Kurve jeweils die Länge, der Radius und wiederum die Längen der Klothoiden bekannt sein. Zur Beschaffung der benötigten Daten wurde



Abbildung 34: Vorbild für die im Fahrsimulator nachgebildete Versuchsstrecke

zum einen *Google Earth Pro* verwendet. Zum anderen wurde die Strecke mit einem Fahrzeug abgefahren. Zwei Videokameras dokumentierten die Strecke. Eine Kamera war mit einem Weitwinkelobjektiv ausgestattet, um einen Überblick über das gesamte Sichtfeld zu erhalten, die zweite Kamera war nur auf die Position der Schilder ausgerichtet. Alle Videodaten wurden einmal digital auf dem Band der Kamera und zusätzlich zur direkten Weiterverarbeitung über ein USB-Kabel auf der Festplatte eines Notebooks gespeichert. Das Höhenplot und der Streckenverlauf wurden des Weiteren mit einem GPS-Logger (*eTrex Vista HCx* der Firma *Garmin*) entlang der Strecke aufgezeichnet.

Die Streckenprogrammierung geschieht in der Simulationsumgebung *STISIM Drive* über die *Scenario Definition Language* (SDL). Hier wird die Gesamtstrecke aus einer Anzahl von Events (z. B. Kurven, Bäume, Fahrstreifen, andere Fahrzeuge, Baustellenabspernung) zusammengestellt.

Die real existierenden Schilder zur Begrenzung der Geschwindigkeit können direkt den aufgezeichneten Videos entnommen werden und wurden weitestgehend übernommen. Nur an wenigen Stellen sind die Geschwindigkeitsvorgaben abgeändert worden. Die Versuchsstrecke enthält nur 80-, 100- und 120 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ -Schilder. *STISIM Drive* bietet nur wenige Schilder für den deutschen Straßenverkehr. Einige wichtige Schilder wurden daher selbst angelegt und eingebunden (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung auf 120 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$). Dazu kommt noch das Schild „Geschwindigkeitsbegrenzung aufgehoben“, welches den Probanden auch die Möglichkeit bietet, die Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs (140 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$) zu nutzen. Bei Probefahrten zeigt sich, dass es generell schwierig ist, die Geschwindigkeit richtig einzuschätzen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, erwies es sich als hilfreich, Bäume auf den Flächen jenseits des Seitenstreifens zufällig zu verteilen.

Aufgrund von Darstellungsschwierigkeiten des Simulators bei hohen Geschwindigkeiten wurde entschieden, die maximale Geschwindigkeit auf 140 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ zu begrenzen.

Generell konnte der Fremdverkehr in gleicher Fahrtrichtung nicht über die SDL programmiert werden, wie dies normalerweise getan wird, da diese Fahrzeuge für die Regler, die in *OpenModul* erstellt wurden, unsichtbar sind. Der Fremdverkehr muss somit in *OpenModul* erzeugt werden, was einen erheblichen Mehraufwand bedeutet (es müssen beispielsweise bei jeder Tempolimitveränderung jedem Fahrzeug neue Geschwindigkeits-

werte zugewiesen werden, oder es muss bei einer Fahrstreifenreduzierung dafür gesorgt werden, dass die Fahrzeuge vom betreffenden Fahrstreifen entfernt werden). Die Programmierung in *OpenModul* hat noch einen weiteren Nachteil: Es war nicht möglich, Fahrstreifenwechsel anderer Verkehrsteilnehmer zu gestalten. Die Rechenleistung des Simulators reicht hierfür nicht aus, da die für das Egofahrzeug entwickelten Regler für jedes Fremdfahrzeug hätten programmiert und implementiert werden müssen.

Lange Versuchsstrecken, Kurven und Höhenprofile verursachen in der Simulation in *STI-SIM Drive* eine hohe Rechenleistung und reduzieren die Anzahl der Bilder, die der Fahrsimulator pro Sekunde darstellen kann. Diese Framerate hat auch Auswirkung auf die Regler, da die Framerate identisch zur Aufruftrate der *OpenModul-DLL*-Datei ist, in der die Regler hinterlegt sind. Da bei digitaler Regelung die Aufruftrate maßgeblich zu einer hohen Regelgüte beiträgt, mussten einige Optimierungen vorgenommen werden.

Die insgesamt 120 km lange Versuchsstrecke wurde daher in zwei gleich lange Elemente unterteilt. Auf der Höhe von Seligenstadt wurde die Strecke getrennt (Szenario 1: Darmstadt bis Seligenstadt; Szenario 2: Seligenstadt bis Würzburg). Des Weiteren mussten Elemente wie Leitplanken und Gebäude wieder aus der Simulation entfernt werden.

Als besonders kritisch für die Rechenleistung erwiesen sich lang gezogene Kurven (Kurvenradius $> 2\,500$ m). Dort wurde die Framerate an manchen Stellen auf unter 10 Bilder pro Sekunde gesenkt, was die Auslegung der Regler erschwerte und bei Versuchspersonen zu großem Unbehagen führte (in der Regel wird eine Bildwiederholungsrate von mindestens 20 Bildern pro Sekunde empfohlen; vgl. Schlick *et al.*, 2010, S. 320).

Eine weitere Optimierung musste bei der Erstellung des Verkehrs vorgenommen werden. Da nicht mehr als ca. 40 Fahrzeuge erstellt werden konnten und trotzdem nicht auf einen ständigen Fremdverkehr verzichten werden sollte, wurden Fahrzeuge, die ca. 2 km hinter dem Egofahrzeug fuhren, wieder nach vorne gesetzt. Fahrzeuge, die dem Egofahrzeug zu weit voraus gefahren waren, wurden ca. 2 km hinter das Egofahrzeug gesetzt. Somit konnte ein durchgängiger Fremdverkehr erstellt werden, der dem Simulationscomputer nur eine moderate Rechenleistung abverlangt.

Der Fremdverkehr in gleiche Fahrtrichtung wurde aus 40 Fahrzeugen aufgebaut, welche sich im Fall einer Fahrbahn mit vier Fahrstreifen je Richtung auf drei Fahrstreifen verteilen. Der Fahrstreifen ganz links bleibt somit weitestgehend frei von Verkehr, so dass dem Egofahrzeug die Möglichkeit gegeben wird, zu überholen und Kollisionen zu vermeiden. Diese Vereinfachung ist nötig, da die Versuchspersonen langsamere Fahrzeuge überholen sollten, diese Fahrzeuge aber durch einen Fahrstreifenwechsel nicht Platz machen konnten. Um dieser realitätsvermindernden Optimierungsnotwendigkeit entgegenzuwirken, wurde der Fremdverkehr durch das Bilden von Kolonnen den tatsächlichen Straßenverkehrssituationen angeglichen.

Die im Folgenden beschriebenen Verteilungen wurden für den Fremdverkehr verwendet. Im Fall von vier Fahrstreifen wird die folgende Verteilung von Fahrzeugen verwendet:

- Erster Fahrstreifen von links: Kein Fremdverkehr
- Zweiter Fahrstreifen von links: 8 Fahrzeuge, $120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, Kolonnen mit 2×2 Fahrzeugen und 3×2 Fahrzeug
- Dritter Fahrstreifen von links: 15 Fahrzeuge, $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, Kolonnen mit 1×3 , 3×2 Fahrzeugen und 6×1 Fahrzeug
- Vierter Fahrstreifen von links: 17 Fahrzeuge, $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, Kolonnen mit 2×2 , 3×2 Fahrzeugen und 5×1 Fahrzeug

Im Fall von drei Fahrstreifen wird die folgende Verteilung von Fahrzeugen verwendet:

- Erster Fahrstreifen von links: Kein Verkehr
- Zweiter Fahrstreifen von links: 8 Fahrzeuge, $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, Kolonnen mit 2×2 Fahrzeugen und 3×2 Fahrzeug
- Dritter Fahrstreifen von links: 17 Fahrzeuge, $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$, Kolonnen mit 2×2 , 3×2 Fahrzeugen und 5×1 Fahrzeug

Neben der Abbildung der realen Strecke wurden Sondersituationen eingefügt. Um sicherzustellen, dass der Proband einige Fahrstreifenwechsel durchführt, wurden an mehreren Stellen Baustellen, die zu einer Verringerung der Anzahl an Fahrstreifen führten, eingefügt (Sondersituation „Baustelleneinfahrt“). Insgesamt waren in jedem Szenario vier solcher Baustellen enthalten. Bei einigen wurden die Probanden ca. 500 m bevor die Baustelle in Sicht gekommen war, über ein automatisch von der Simulationssoftware aufgerufenes Audiofile aufgefordert, auf den linken Fahrstreifen (der bei der Baustelle wegfallen wird) zu wechseln.

Des Weiteren wurde ein ca. 3 km langes Nebelstück implementiert (Sondersituation „Nebel“), das zur Evaluierung der Risikohomöostase verwendet werden sollte. Die Sichtweite betrug im Nebel 50 m. Der Nebel trat nicht plötzlich auf, sondern es wurden Übergangsphasen von ca. 300 m implementiert. Des Weiteren befand sich der Nebel hinter einer Kuppe, um das Auftreten realistischer zu gestalten.

Für die Überprüfung der *Situation Awareness* und *Mode Awareness* wurden gezielte Systemausfälle in das Versuchskonzept mitaufgenommen. Die Systemausfälle lassen sich in zwei Kategorien unterteilen. Bei schweren Systemausfällen wird das gesamte System ausgeschaltet und meldet dies nur visuell an den Fahrer zurück. Dies wurde in der Eingewöhnungsfahrt und dem Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung verwendet. Beim leichten Systemausfall wurde ein Geschwindigkeitsschild nicht richtig erkannt, und das technische System reduzierte die Geschwindigkeit nicht auf die neue Geschwindigkeitsbegrenzung.

4.3.5 Versuchsablauf

In Tab. 9 ist der zeitliche Versuchsablauf dargestellt. Die Hauptelemente sind die drei Fahrsimulatorfahrten mit jeweils ca. 35 min (ca. 61 km), wobei die Versuchstrecke bei Fahrt 2 und 3 identisch ist, um eine bessere Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Auf eine Änderung der Versuchsreihenfolge wurde verzichtet. Die 1. Fahrt wurde als Eingewöhnungsfahrt konzipiert und muss daher am Anfang stehen. Da die dritte Fahrt als Vergleichsfahrt für die konventionelle Fahrzeugführung dient und keine kritischen Sondersituationen auftreten, wie beispielsweise der schwere Systemausfall, wurde diese Fahrt ans Ende gestellt.

Zeitdauer	Vorgang
0–5 min	Vorstellung und Begrüßung
5–15 min	Erklärung der manöverbasierten Fahrzeugführung und Versuchsdurchführung
15–20 min	Fragebogen: <i>allgemeiner Fragebogen</i>
20–35 min	Blickbewegungssystem Kalibrierung
35–70 min	1. Fahrt, Eingewöhnungsfahrt mit der manöverbasierten Fahrzeugführung
70–75 min	Fragebogen: NASA TLX ZEIS
75–80 min	Blickbewegungssystem nachkalibrieren
80–115 min	2. Fahrt, überwiegend mit der manöverbasierten Fahrzeugführung
115–135 min	Fragebögen: <i>allgemeiner Fragebogen, Fragebogen zur Systembedienung, Fragebogen zum Bedien- und Anzeigekonzept, Manöverfragebogen, Fragebogen zur Akzeptanz, AttrakDiff, System Usability Scale, NASA TLX ZEIS</i>
135–170 min	3. Fahrt, konventionelle Fahrzeugführung
170–175 min	Fragebögen: NASA TLX ZEIS, <i>System Usability Scale</i>

Tabelle 9: Zeitlicher Ablauf der Versuche

4.4 Datenaufbereitung und Auswertungsmethodik

Wie in Kapitel 4.3.1 dargestellt sind Blickbewegungsdaten, Fahrzeugdaten, Videoaufzeichnungen und subjektive Befragungen (anhand von Fragebögen) aufgenommen worden. In diese vier Abschnitte unterteilt, wird im Folgenden die Datenaufbereitung dargestellt, ein weiterer Absatz zeigt die Auswertungsmethodik der statistischen Analyse.

Blickbewegungsdaten Die Blickbewegungsdaten liegen als digitale Videodatei vor. Das Video zeigt das Bild der Helmkamera, des Blickbewegungssystems sowie den gerade vom Probanden fixierten Punkt als roten Kreis. Eine automatische Auswertung der aufgezeichneten Koordinaten der Blickbewegung durch eine Software ist nicht möglich, da zum einen durch die Bewegung des Kopfes der Versuchsperson eine sich ständig ändernde Orientierung im Raum vorliegt und zum anderen in der Simulation bewegende Objekte nicht erfasst werden können.

Die Auswertung erfolgt mit Hilfe der Software *INTERACT* anhand der in Kapitel 4.3.1 erwähnten AOI. In *INTERACT* wird das Video in Zeitlupe abgespielt. Bei einem Übergang von einem Interessensbereich zum anderen wird vom Auswerter eine Taste auf der Tastatur gedrückt, die den neuen Interessensbereich symbolisiert. Parallel werden somit die Zeitpunkte der Fixation gespeichert und deren Dauer. Für die Auswertung der Blickbewegungsvideos wurde das Sichtfeld in acht verschiedene Bereiche (AOI) eingeteilt, die in Tab. 10 dargestellt sind.

Areas of Interest (AOI)	
Straße	Tachometer
Fahrstreifenmarkierung	Rückspiegel
Verkehrszeichen	Touchscreen
Umwelt	Head-Up-Display

Tabelle 10: AOI (Interessensbereiche), die bei der Blickbewegungsanalyse verwendet wurden

Zur „Straße“ zählt alles, was sich im Bereich der Straße befindet. Dazu gehören ebenfalls andere Verkehrsteilnehmer, nicht aber die Fahrstreifenmarkierungen und die Schilder. Mit „Umwelt“ sind alle Fixationen gemeint, die sich auf dem Fahrsimulatorbild, aber außerhalb der Fahrstreifen in Fahrtrichtung befinden.

In der Auswertung werden alle Fixationen registriert und aufgelistet. Da hier das Auswertungsprogramm *INTERACT* zum Einsatz kommt, wird parallel zu der Auflistung auch die Dauer einer Fixation gemessen. Die Ergebnisse sollen eine Aufstellung über die Dauer und die Häufigkeiten der Fixationen zu den einzelnen Bereichen zeigen. Um dies übersichtlicher zu gestalten, wird dies prozentual dargestellt.

Die Ergebnislisten sind in Textdateien aus *INTERACT* exportiert und in *Matlab R2009a* eingelesen worden. In *Matlab* sind Zwischenrechnungen und statistische Analysen durchgeführt sowie Diagramme erstellt worden.

Fahrzeugdaten *STISIM Drive* liefert die Fahrzeugdaten in Form von Textdateien. Diese wurden in *Matlab R2009a* eingelesen. Eine Besonderheit hier ist die Verwendung von *Cell-Arrays*, die eine Speicherung in mehrdimensionale Felder erlaubt. Dies ist bei der Auswertung sehr hilfreich, da die Daten in den Dimensionen „Versuchsperson“, „Versuchsstrecke“, „Kennwert“ sowie „fortlaufende Zeit“ eingegliedert werden konnten und somit in den *Matlab*-Scripten einfach anzusprechen sind. Das Cell Array, welches die gesamten Versuchsdaten beinhaltet, besteht aus ca. 500 Millionen Einträgen.

Videoaufzeichnung Die Videoaufzeichnung wurde nur verwendet, um Ergebnisse zu plausibilisieren und Situationen, die aus den Fahrzeugdaten nicht erklärt werden konnten, zu evaluieren. Eine Datenaufbereitung fand daher nicht statt.

Subjektive Befragungen anhand von Fragebögen Die Fragebögen wurden in einer *SPSS*-Datei codiert und gespeichert. Ein Großteil der Auswertung fand jedoch in *Matlab* statt, wohin die Daten über Textdateien transferiert wurden. Alle statistischen Analysen sind in *Matlab R2009a* durchgeführt worden.

Auswertungsmethodik der statistischen Analyse Die statistische Auswertung orientiert sich am Vorgehen aus Bortz (2005) und Bleymüller *et al.* (2002) und ist in Abb. 35 zusammengefasst. Werden mehr als zwei Merkmale untersucht, muss eine Varianzanalyse durchgeführt werden, was in der Auswertung nur sehr selten vorkam und an diesen Stellen direkt erklärt wird. Für die Untersuchung von zwei Merkmalen muss zunächst unterschieden werden, ob es sich um abhängige (z. B. ein identisches Versuchspersonenkollektiv beurteilt zwei Prototypen/Systeme) oder unabhängige Stichproben (z. B. zwei Versuchspersonenkollektive beurteilen ein System) handelt. Liegt eine abhängige Stichprobe vor, muss für die Durchführung eines t-Tests für abhängige Stichproben die Voraussetzung

der Normalverteilung gegeben sein. Nach dem Zentralen Grenzwerttheorem ist die Normalverteilung gegeben, wenn ein Stichprobenumfang von ≥ 30 vorliegt. Ist dies nicht der Fall, kann mit dem Lilliefors-Test (Lilliefors, 1967; Matlab R2009a, 2010) oder dem Shapiro-Wilk-Test (Shapiro & Wilk, 1965) die Normalverteilung überprüft werden. Kann diese nicht nachgewiesen werden, muss der Wilcoxon-Test für den Vergleich von zwei abhängigen Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz verwendet werden.

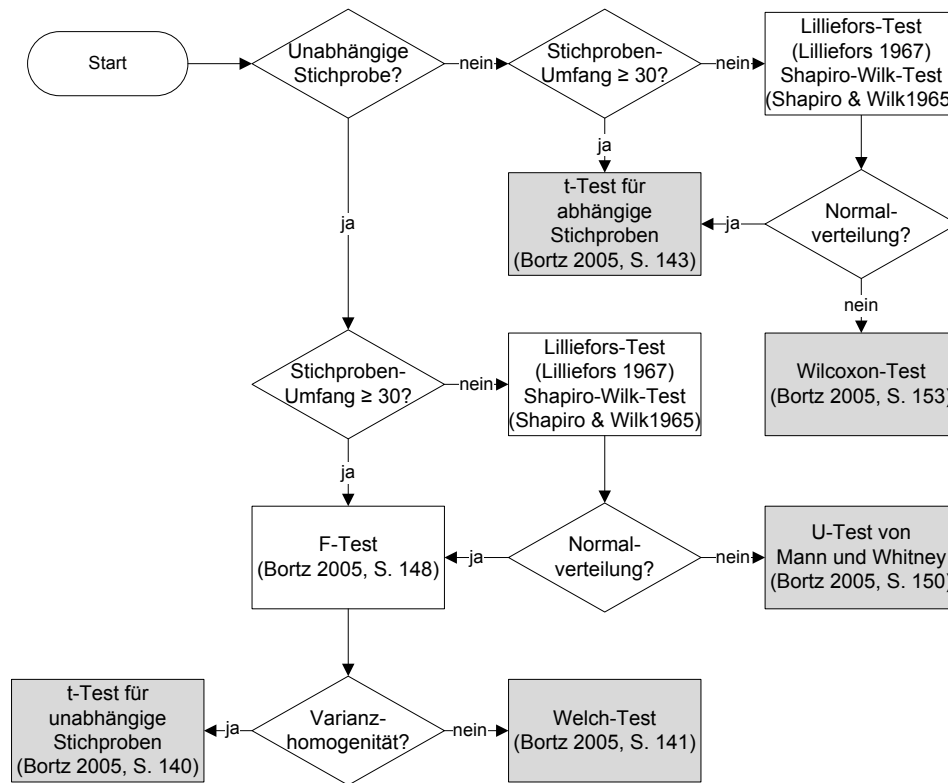


Abbildung 35: Vorgehen bei der Auswahl des statistischen Tests

Liegen unabhängige Stichproben vor, muss ebenfalls mit einem Test (Lilliefors-Test und Shapiro-Wilk-Test) die Normalverteilung überprüft werden, sofern der Stichprobenumfang nicht ≥ 30 ist. Lässt sich die Normalverteilung nicht nachweisen, wird der Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz mit einem *U-Test* von Mann-Whitney überprüft (Bortz, 2005).

Die zweite notwendige Voraussetzung für den t-Test für unabhängige Stichproben der Varianzhomogenität wird mit einem F-Test überprüft (Bortz, 2005). Ist Varianzhomogenität gegeben, werden die Stichproben mit einem t-Test für unabhängige Stichproben untersucht (Bortz, 2005). Liegt keine Varianzhomogenität vor, stößt man bei der Auswertung über den t-Test für unabhängige Stichproben auf das Behrens-Fisher-Problem (Bortz, 2005), das nach Welch (1947) (vgl. auch Bortz, 2005) über eine Korrektur der Freiheitsgrade gelöst werden kann (Welch-Test). Die Korrektur ist in der *Statistic Toolbox* von *Matlab* (R2009a) bei der Verwendung des t-Test für unabhängige Stichproben direkt integriert und auswählbar.

Soll die Ähnlichkeit von Verteilungen überprüft werden, wird der X^2 -Homogenitätstest angewandt (Bleymüller *et al.*, 2002).

4.5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie mit erfahrenen Fahrern (Kapitel 4.5.1) und Novizen (Kapitel 4.5.2) gezeigt sowie die in Kapitel 4.3.2 aufgestellten Hypothesen evaluiert (Kapitel 4.5.3).

4.5.1 Allgemeine Ergebnisdarstellung der erfahrenen Fahrer ($N = 41$)

Zunächst werden die Ergebnisse aus der Fahrsimulatoruntersuchung mit 41 erfahrenen Fahrern dargestellt. Für einige Fragestellungen ist das Aufstellen einer sinnvollen statistischen Hypothese unmöglich, beispielsweise, wenn die Interaktion des Fahrers mit dem System beschrieben werden soll (z. B. Manöverhäufigkeit pro Versuchsperson) oder Subjektivurteile der Probanden dargestellt werden. Außerdem werden aus Gründen der Vollständigkeit Ergebnisse dargestellt, ohne explizit auf die aufgestellten Hypothesen aus Kapitel 4.3.2 einzugehen. Die Überprüfung der Hypothesen hinsichtlich der erfahrenen Fahrer erfolgt zusammen mit den Novizen in Kapitel 4.5.3.

Blickbewegung Die Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse sind in Abb. 36 und 37 zu finden. Dargestellt sind die relative Blickzuwendungsdauer (Abb. 36) und die relative Blickzuwendungshäufigkeit (Abb. 37), gemittelt über alle in die Auswertung einbezogenen Versuchspersonen ($N = 34$).

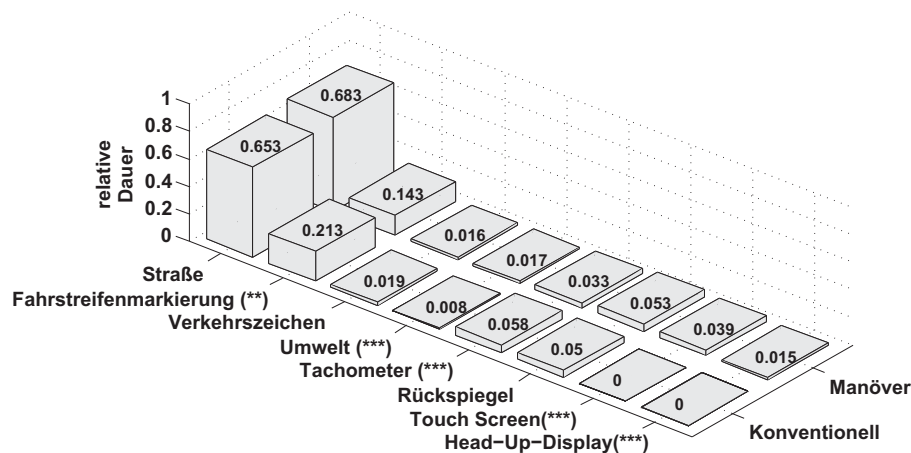


Abbildung 36: Relative Blickzuwendungsdauer bei konventioneller und manöverbasierter Fahrzeugführung ($N = 34$); (*)=signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,05$), (**) =hoch signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,01$), (***)=höchst signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,001$)

Die Unterschiede der Blickzuwendungsdauer zwischen den beiden Versuchsfahrten wurde anhand von t-Tests (Zweistichprobentest für die Differenz zweier arithmetischer Mittel bei verbundener Stichprobe) ermittelt. Die t-Tests hinsichtlich der Blickzuwendungsdauer zeigen, dass ein höchst signifikanter Unterschied zwischen den AOI „Umwelt“ ($t = 4,14$; $df = 33$; $p < 0,001$), „Tachometer“ ($t = -8,79$; $df = 33$; $p < 0,001$), „Touchscreen“ ($t = 15,51$; $df = 33$; $p < 0,001$) und „Head-Up-Display“ ($t = 14,11$; $df = 33$; $p < 0,001$) sowie ein hoch signifikanter Unterschied für das AOI „Fahrstreifenmarkierungen“ ($t = -3,05$; $df = 33$; $p = 0,005$) zwischen der manöverbasierten und der konventionellen

nellen Fahrt vorliegt. Die restlichen AOI „Straße“ ($t = 1,22$; $df = 33$; $p = 0,230$), „Verkehrszeichen“ ($t = -1,82$; $df = 33$; $p = 0,077$) und „Rückspiegel“ ($t = 0,95$; $df = 33$; $p = 0,350$) zeigten keine signifikanten Unterschiede.

Unterschiede in der Blickzuwendungshäufigkeit auf verschiedener AOI wurden ebenfalls mit t-Test (Zweistichprobentest für die Differenz zweier arithmetischer Mittel bei verbundener Stichprobe) ermittelt. Es liegen höchst signifikante Ergebnisse für die AOI „Umwelt“ ($t = 5,84$; $df = 33$; $p < 0,001$), „Tachometer“ ($t = -10,54$; $df = 33$; $p < 0,001$), „Touchscreen“ ($t = 15,92$; $df = 33$; $p < 0,001$) und „Head-Up-Display“ ($t = 15,44$; $df = 33$; $p < 0,001$) vor.

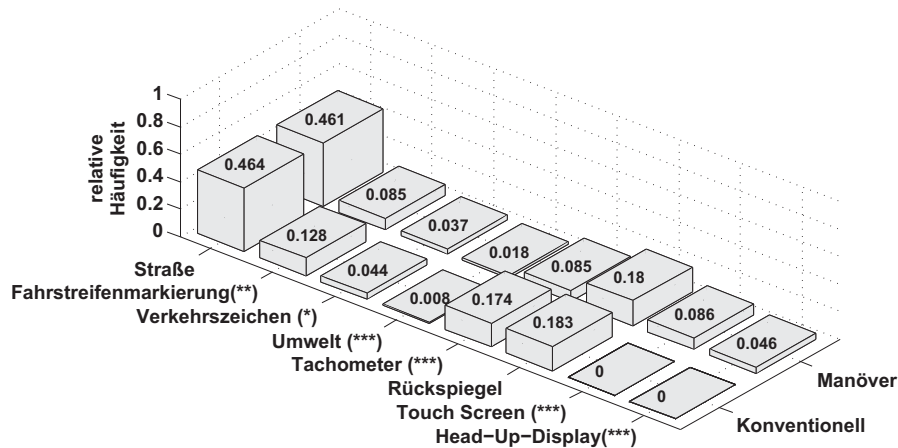


Abbildung 37: Relative Blickzuwendungshäufigkeit bei konventioneller und manöverbasierter Fahrzeugführung ($N = 34$); (*)=signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,05$),(**)=hoch signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,01$),(***)=höchst signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,001$)

Ein hoch signifikanter Unterschied liegt bei dem AOI „Fahrstreifenmarkierung“ ($t = -3,21$; $df = 33$; $p = 0,003$) vor, ein signifikanter Unterschied ist für das AOI „Verkehrszeichen“ zu finden ($t = -2,18$; $df = 33$; $p = 0,036$). Die AOI „Straße“ ($t = -0,2366$; $df = 33$; $p = 0,815$) und „Rückspiegel“ ($t = -0,22$; $df = 33$; $p = 0,827$) weisen keine signifikanten Unterschiede auf.

Die Ergebnisse für AOI, die kleine Anteilswerte aufweisen (sowohl bei der Blickzuwendungshäufigkeit als auch bei der Blickzuwendungsdauer), müssen mit Einschränkung betrachtet werden. Messfehler können hier deutlich stärkeren Einfluss besitzen als bei AOI mit hohen Anteilswerten. Dass höchst signifikante Ergebnis für den Unterschied der Blickzuwendungshäufigkeit als auch der Blickzuwendungsdauer für die AOI „Touchscreen“ und „Head-Up-Display“ vorliegen, ist zu erwarten gewesen, da diese bei der konventionellen Fahrzeugführung nicht betrachtet werden konnten.

Manöver- und Parameterinteraktion Ein wichtiger Aspekt bei der Evaluierung der manöverbasierten Fahrzeugführung ist die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion selbst. Diese kann mit objektiven und subjektiven Kennwerten untersucht werden. In diesem Abschnitt werden die objektiven Kennwerte der Interaktionshäufigkeit über die Versuchspersonen sowie der Interaktionshäufigkeit über die Versuchsstrecke gezeigt.

In Abb. 38 ist die Häufigkeit von Manöver- (Abb. 38 oben) und Parametereingaben (Abb. 38 unten) durch den Fahrer dargestellt. Insgesamt fällt auf, dass bis auf einige wenige Ausnahmen die Anzahl an Manöveraufträgen gleichmäßig über die Versuchsstrecke verteilt sind. Lediglich im Streckenabschnitt 5–7 km und 33–34 km liegen fast keine Manöveraufträge vor. Die Ursache dafür liegt in der Anweisung an die Versuchspersonen, in diesem Abschnitt manuell zu fahren. Eine Häufung von Manöveraufträgen zeigt sich jeweils nach den eben erwähnten manuellen Abschnitten, da dort das System über das Manöver „Straße folgen“ wieder aktiviert wurde. Eine weitere Häufung liegt im Streckenabschnitt 11–12 km vor, in dem die Versuchspersonen aufgefordert wurden, mit Hilfe des Manövers „rechts ranfahren“ am rechten Fahrbahnrand anzuhalten.

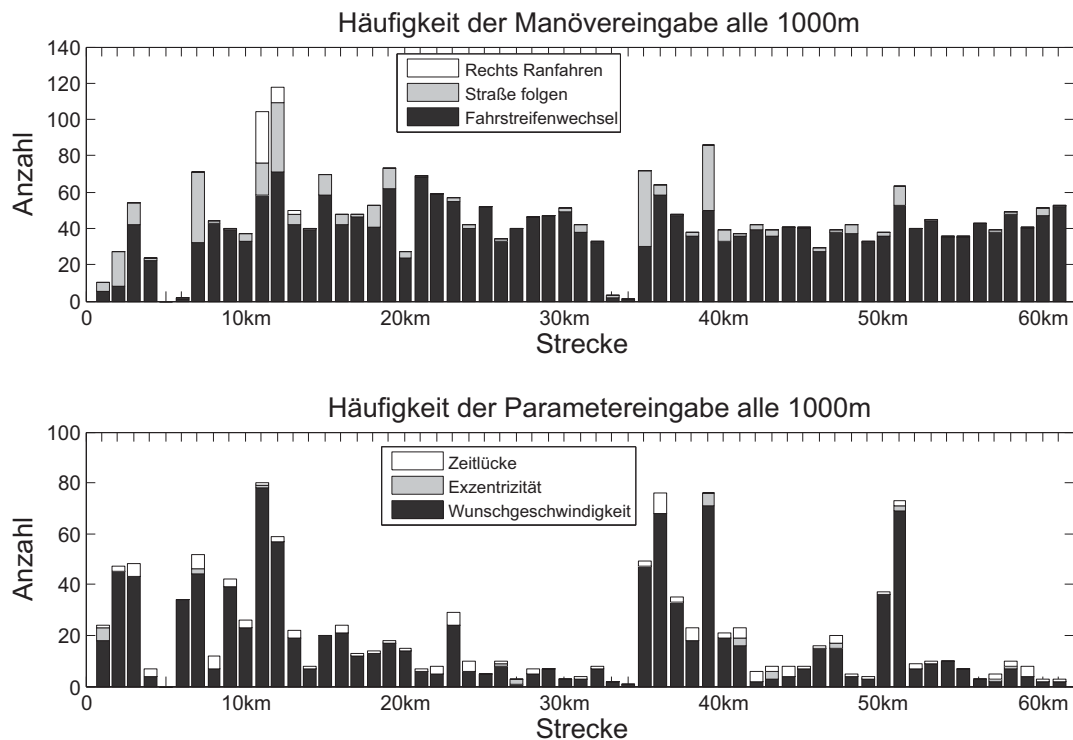


Abbildung 38: Anzahl der Manöver- und Parametereingaben über die Versuchsstrecke (61 km) aggregiert für 1000-m-Abschnitte ($N = 41$)

Die Ursache für die gleichmäßige Verteilung ist im Manöver „Fahrstreifenwechsel“, dem häufigsten Manöver, zu finden. Insgesamt wurden 2 361 Fahrstreifenwechsel von den 41 Versuchspersonen beauftragt. Die beiden anderen Manöver „Straße folgen“ und „rechts ranfahren“ wurden nur punktuell und mit 39-mal („rechts ranfahren“) und 340-mal („Straße folgen“) deutlich seltener beauftragt. Durchschnittlich wurden demnach $44,92 \frac{\text{Manöver}}{\text{km}}$ ($\sigma = 21,05 \frac{\text{Manöver}}{\text{km}}$) oder $1,10 \frac{\text{Manöver}}{\text{km} \cdot \text{Versuchsperson}}$ beauftragt.

Die Anzahl der tatsächlich ausgeführten Manöver kann sich davon unterscheiden, da ein Manöverauftrag nur durchgeführt wird, wenn der Zielfahrstreifen frei ist. Außerdem sind im Szenario, in dem die Manöverführung getestet wurde, auch kurze Abschnitte konventionell absolviert worden. Die tatsächliche Anzahl an Fahrstreifenwechseln in diesem Szenario liegt bei 2 636. Im Szenario der konventionellen Fahrzeugführung wurden auf der gleichen Strecke mit dem gleichen Verkehrsaufkommen 3 068 Fahrstreifenwechsel durch-

geführt. Die Ergebnisse wurden mit einem t-Test für gepaarte Stichproben untersucht, und zeigen einen höchst signifikanten Unterschied ($t = -5,81$; $df = 40$; $p < 0,001$). Die Manöverführung hat demnach zu einer Reduzierung von Fahrstreifenwechseln geführt. Wie bei den Manövern gibt es Parameter, die wesentlich häufiger beauftragt werden als andere. Insgesamt wurde 1 081-mal die „Wunschgeschwindigkeit“ geändert, 28-mal eine „Exzentrizität“ beauftragt und 116 Anpassungen der „Zeitlücke“ vorgenommen. Die „Exzentrizität“ wurde somit weniger als ein Mal pro Fahrt und Versuchsperson verwendet. Die homogene Verteilung der Manöver über die Versuchstrecke ist bei den Parametern nicht wiederzufinden. Speziell im Bereich zwischen der Kilometermarke 35 und 40 sind deutlich mehr Anpassungen der Wunschgeschwindigkeit gemacht worden. Die Ursache liegt hier in der Veränderung der Umwelteinflüsse begründet, da in diesem Bereich Nebel mit einer Sichtweite von 50 m bewältigt werden musste. Dies veranlasste viele der Versuchspersonen zu einer Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit, die während der Manöverführung nur über eine Veränderung der Wunschgeschwindigkeit erreicht werden konnte.

Bezogen auf die durchschnittliche Dauer (2 005 s), die die Versuchspersonen für die Absolvierung der 61 km benötigt haben, ist alle 20,73 s ein Manöver oder Parameter beauftragt worden.

Neben der Auswertung, wie viele Manöver über den Streckenverlauf beauftragt worden sind, ist die interindividuelle Darstellung der Beauftragung von Manövern und Parametern entscheidend. In Abb. 39 sind diese Daten dargestellt. Im oberen Diagramm ist die Häufigkeit der Manövereingaben für jede einzelne Versuchsperson dargestellt. Auch hier ist eine relativ homogene Verteilung zu finden. Lediglich Versuchsperson 39 beauftragte deutlich weniger Manöver als die übrigen Versuchspersonen.

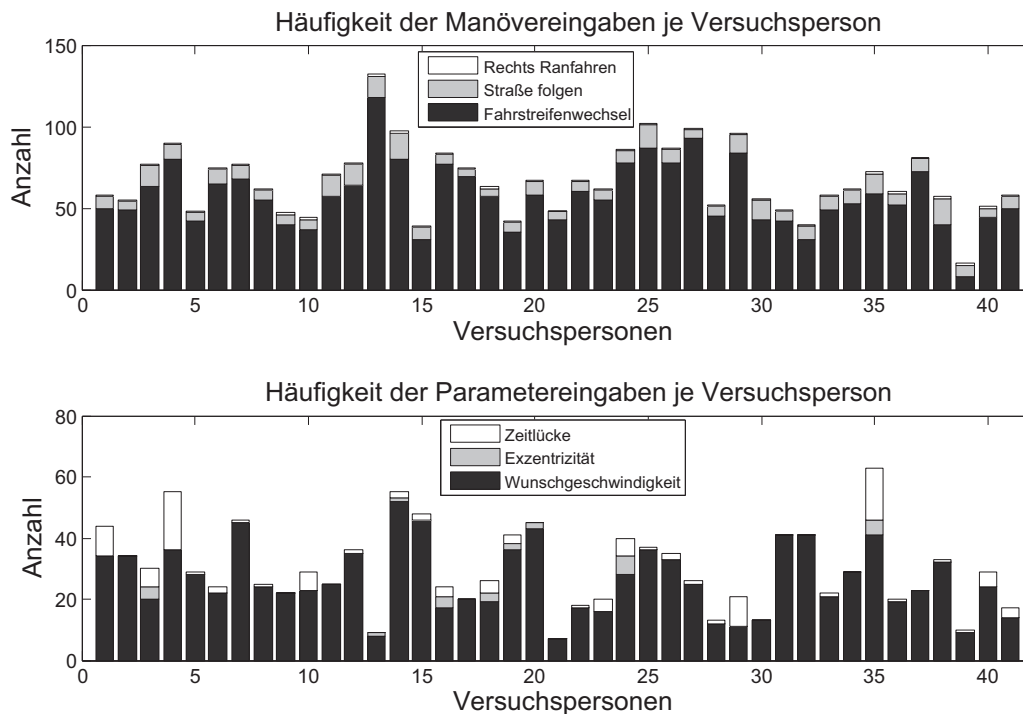


Abbildung 39: Anzahl der Manöver- und Parametereingaben pro Versuchsperson ($N = 41$)

Die Ergebnisse der Parameter zeigen wiederum kein homogenes Bild. Einige Versuchspersonen kommen mit sehr wenigen Parametereinstellungen aus (z. B. Nr. 13, 21 und 39), andere erreichen fast eine Parametereingabe pro km (z. B. Nr. 4, 14 und 35). Auffällig ist noch, dass Versuchspersonen Nr. 4 und 35, im Vergleich zu den anderen Probanden, sehr viele Anpassungen der „Zeitlücke“ aufweisen.

Durchschnittliche Geschwindigkeit bei der Absolvierung der gesamten Fahrmission In Abb. 40 links ist die durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der die Versuchspersonen in der manöverbasierten und konventionellen Fahrt gefahren sind, dargestellt. Zwischen diesen beiden Fahrten besteht ein höchst signifikanter Unterschied ($t = -8,86$; $df = 40$; $p < 0,001$). Die Versuchspersonen fahren ohne Unterstützung im Durchschnitt $1,90 \frac{m}{s}$ schneller (Durchschnittsgeschwindigkeit Manöver: $30,43 \frac{m}{s}$; Durchschnittsgeschwindigkeit Konventionell: $32,32 \frac{m}{s}$). Der Ausreißer bei der manöverbasierten Fahrt (durchschnittliche Geschwindigkeit $< 25 \frac{m}{s}$) ist zum Teil damit zu erklären, dass diese Versuchsperson im Nebel die Geschwindigkeit auf etwa $10 \frac{m}{s}$ gesenkt hat. Das rechte Diagramm aus Abb. 40 zeigt den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit bei manöverbasierter und konventioneller Fahrzeugführung. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson (vgl. Bortz, 2005) liegt bei $\rho = 0,620$. In gewissem Maße zeigt dies, dass Versuchspersonen, die tendenziell schneller bei der konventionellen Fahrzeugführung fahren, dies auch bei manöverbasierter Fahrzeugführung tun.

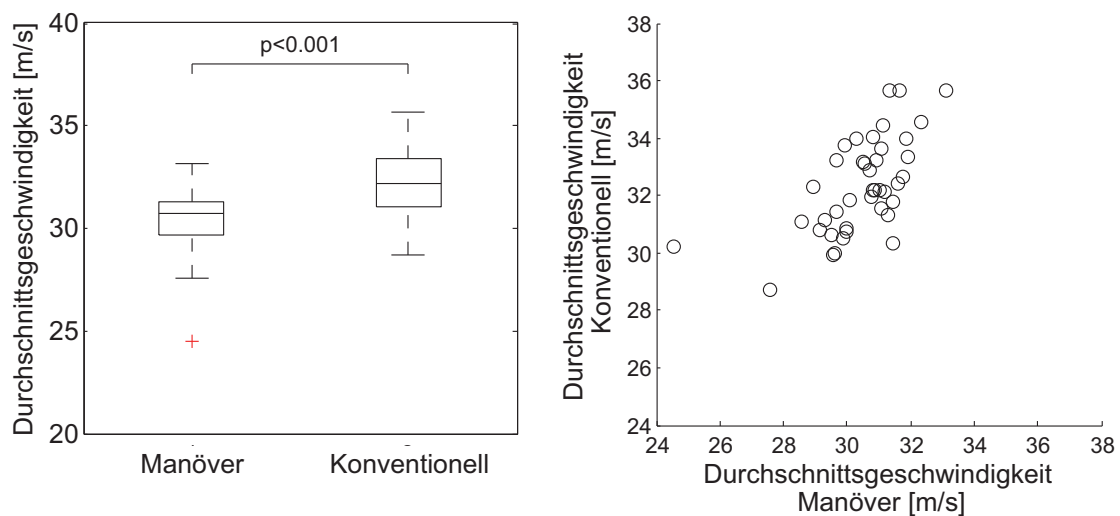


Abbildung 40: Durchschnittliche Geschwindigkeit der Versuchspersonen ($N = 41$) bei manöverbasierter Fahrzeugführung (Manöver) und konventioneller Fahrzeugführung (Konventionell) als Boxplot (links) und als Scatterplot (rechts)

Fahrstreifenwahl In Abb. 41 ist die relative Häufigkeitsverteilung hinsichtlich des Anteils an befahrenen Fahrstreifen dargestellt. Für die Auswertung wurde in 10-m-Abständen aufgenommen, wie viele Versuchspersonen sich auf welchem Fahrstreifen aufhielten. Wie man erkennen kann, wählten die Versuchspersonen bei manöverbasierter und konventioneller Fahrzeugführung ähnliche Fahrstreifen. Tendenziell wurde bei der manöverbasierten Fahrzeugführung ein Fahrstreifen weiter links gewählt (linker Fahrstreifen

3,5 % öfter befahren). Ein X^2 -Homogenitätstest ($X^2 = 0,149, p = 0,9854$) zeigt jedoch, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Verteilungen der Stichprobe besteht.

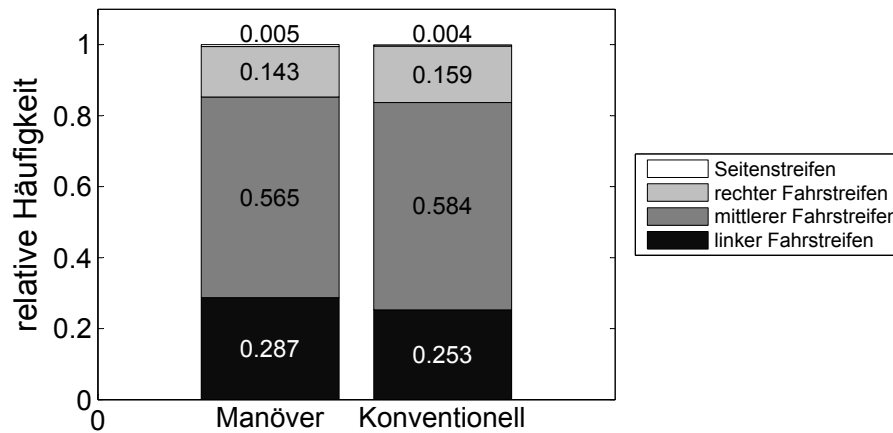


Abbildung 41: Relative Anteile, welcher Fahrstreifen befahren wurde, über die gesamte Versuchsstrecke (61 km) und über alle Versuchspersonen ($N = 41$)

Gebrauchstauglichkeit der manöverbasierten Fahrzeugführung Mit Hilfe des *System Usability Scale*- und des *AttrakDIFF*-Fragebogens wurde die Gebrauchstauglichkeit der manöverbasierten und zum Vergleich auch die der konventionellen Fahrzeugführung erhoben. Dargestellt werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse des SUS (vgl. Abb. 42), da der AttrakDiff stärker auf hedonische Aspekte ausgelegt ist (Hassenzahl *et al.*, 2003) und die Evaluierung der Akzeptanz einer manöverbasierten Fahrzeugführung bewusst ausgeschlossen wurde.

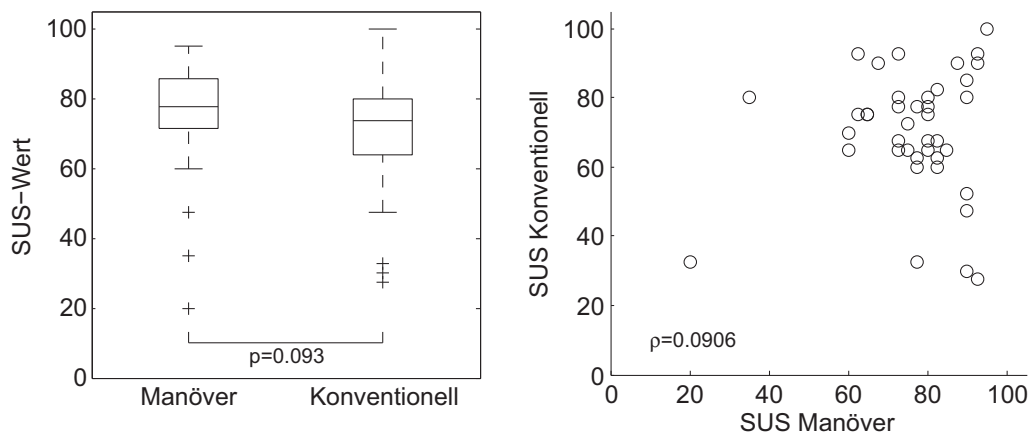


Abbildung 42: SUS-Werte für die manöverbasierte und konventioneller Fahrzeugführung als Boxplot (links) und als Streudiagramm (rechts), ($N = 41$)

In Abb. 42 links sind die SUS-Werte für den manöverbasierten und konventionellen Fall in einem Boxplot abgebildet. Das Streuband bei Manöverführung ist kleiner. Der Mittelwert der Bewertung über alle 41 Versuchspersonen liegt im manöverbasierten Fall

($\mu = 75,43$; $\sigma = 15,41$) höher als bei der konventionellen Fahrzeugführung ($\mu = 70,13$; $\sigma = 17,66$) (nach Brooke, 1996 ist die beste Bewertung beim SUS 100 Punkte). Die Unterschiede sind allerdings nicht signifikant ($t = 1,729$; $df = 39$; $p = 0,094$).

In Abb. 42 rechts sind die SUS-Werte jeder Versuchsperson für den manöverbasierten und konventionellen Fall gegeneinander aufgetragen. Die meisten Paarungen liegen im rechten oberen Quadranten. Es ist weder im Streudiagramm, noch über den Pearson-Korrelationskoeffizienten ($\rho = 0,091$) ein Zusammenhang erkennbar.

Trajektorie beim Fahrstreifenwechsel In Abb. 43 sind die Bahnkurven der manöverbasierten (oben) und der konventionellen Fahrzeugführung (unten) aufgetragen. In beiden Abbildungen sind alle Verläufe dargestellt, die in einem Abschnitt von 400 m nur einen Fahrstreifenwechsel durchgeführt haben. Um eine einheitliche Darstellung zu gewährleisten, wurden die Verläufe auf eine Strecke normiert. Der Ort, an dem das Egofahrzeug dabei die Fahrstreifenmarkierung zwischen dem linken und dem rechten Fahrstreifen überfahren hat, wurde auf den Wert null gesetzt. Die Strecke jeweils 200 m vor und nach diesem Punkt wurde in die Betrachtung miteingeschlossen und dargestellt. Wie in der Abb. 43 zu erkennen ist, sind die Verläufe für den teilautomatisierten Fall, wie erwartet, homogen. Es sind kaum Pendelbewegungen zu erkennen. Dass manche Verläufe um eine gewisse Länge in Y-Richtung verschoben sind, ist durch Kurvenfahrten zu erklären, in denen die Zentrifugalkraft vorhanden ist.

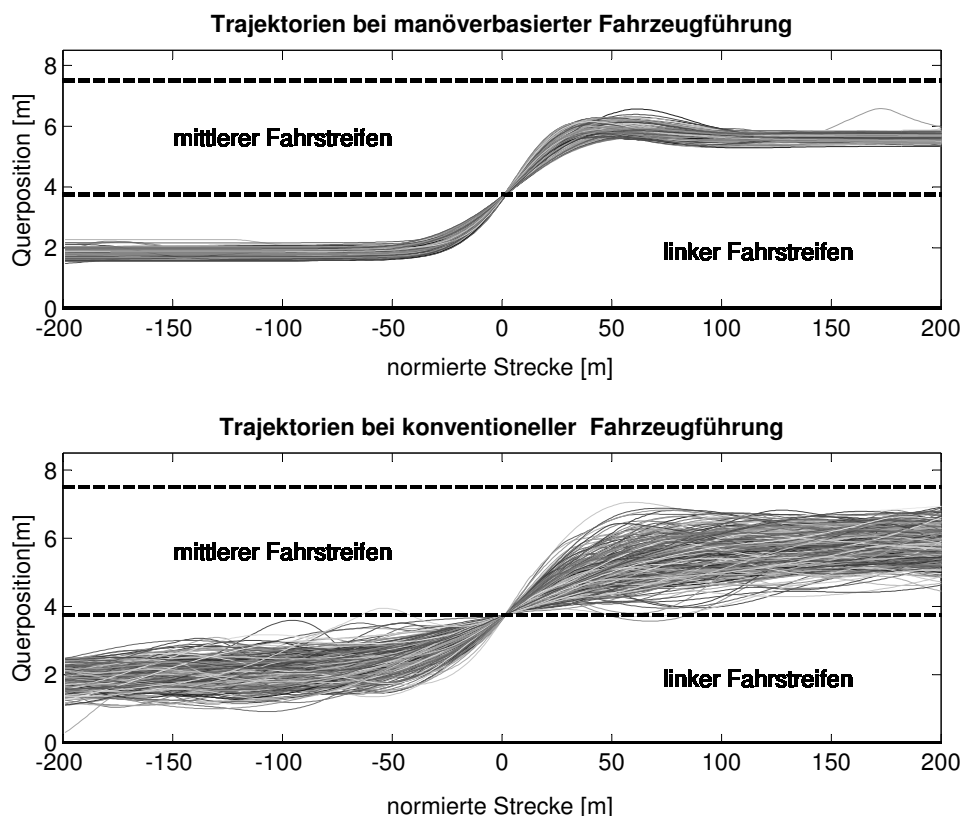


Abbildung 43: Trajektorien bei der Absolvierung von Fahrstreifenwechseln bei manöverbasierter und konventioneller Fahrzeugführung

Im Fall der konventionellen Fahrzeugführung ist deutlich ein Streuband zu erkennen. Die Regelung durch den Menschen ist nicht homogen. Der Fahrer lässt sich bei der Absolvierung eines Fahrstreifenwechsels allerdings mehr Zeit. Ein Großteil der Versuchspersonen wählte eine geringere Querpositionsänderung pro Längsstreckeneinheit.

Geschwindigkeitsverhalten im Nebel Führt ein Fahrer in eine Nebelbank, reduziert er aufgrund der verringerten Sichtweite in der Regel die Geschwindigkeit (Liang *et al.*, 1998). Wie in Abb. 44 zu erkennen ist, haben die Versuchspersonen in diesem Versuch dementsprechend reagiert. Während des Nebelabschnittes (ohne die Ein- und Auslaufzone) lag die Durchschnittsgeschwindigkeit mit manöverbasierter Fahrzeugführung bei $26,39 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($\sigma = 5,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) und demnach auf einem ähnlichen Niveau wie bei konventioneller Fahrzeugführung ($\mu = 26,04 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $\sigma = 6,34 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Ein t-Test belegt diese Beobachtung und zeigt keinen signifikanten Unterschied ($t = 0,43$; $df = 40$; $p = 0,667$) zwischen manöverbasierter und konventioneller Fahrzeugführung (vgl. Abb. 44 links).

Im Vergleich zu den Durchschnittsgeschwindigkeiten über die gesamte Versuchsstrecke (vgl. Abb. 40) sind die Durchschnittsgeschwindigkeiten im Nebel signifikant langsamer. Ein t-Test für gepaarte Stichproben weist sowohl für die manöverbasierte ($t = 5,28$; $df = 40$; $p < 0,001$) als auch für die konventionelle Fahrzeugführung ($t = 7,33$; $df = 40$; $p < 0,001$) einen höchst signifikanten Unterschied in der Durchschnittsgeschwindigkeit auf.

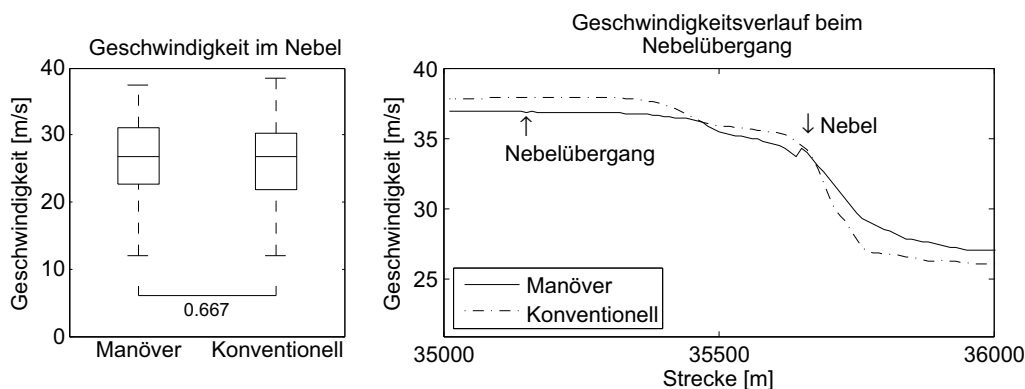


Abbildung 44: Geschwindigkeit während einer Fahrt durch Nebel; der Nebel beginnt bei 35 150 m und nimmt im Bereich bis zu 35 650 m stetig zu, bis er ab diesem Wert mit einer Sichtweite von 50 m konstant bleibt ($N = 41$)

Obwohl kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten vorliegt, ist in Abb. 44 rechts qualitativ zu erkennen, dass die Anpassung der Geschwindigkeit bei manöverbasierter Fahrzeugführung länger gedauert hat. Eine Ursache könnte das Wegnehmen des Fußes vom Gaspedal sein, was bei konventioneller Fahrzeugführung möglich ist und zu einer frühzeitigen Verringerung der Geschwindigkeit führt.

Dauer, in der unterhalb einer Zeitlücke von 0,5 s gefahren wurde Um Sicherheitsaspekte zu untersuchen, wurde die Zeitlücke näher betrachtet. Kleine Zeitlücken sind oft die Ursache für Unfälle und erhöhen das Risiko eines Auffahrunfalls. In Abb. 45 sind die aggregierten Zeitanteile dargestellt, in denen die Versuchspersonen eine Zeitlücke zu einem vorausfahrenden Fahrzeug von 0,5 s unterschritten haben.

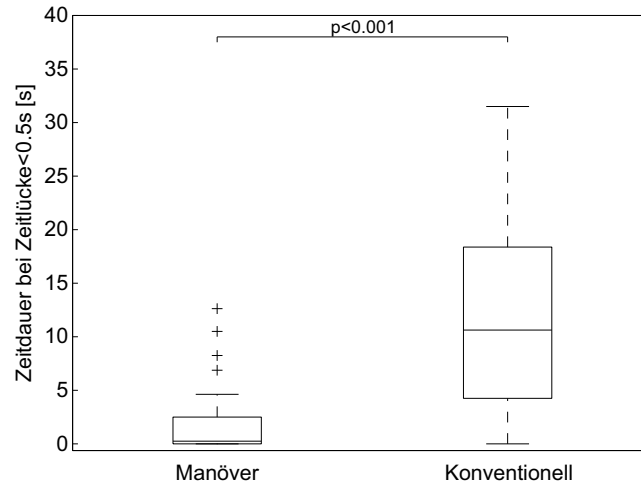


Abbildung 45: Aggregierte Dauer, in der die Versuchspersonen unterhalb einer Zeitlücke von 0,5 s gefahren sind.

Dass die Zeitanteile für die Manöverführung sehr gering sind, ist nicht überraschend, da das System im Normalfall keine Zeitlücken von unter 1 s zulässt. Dass es dennoch zu solchen Situationen gekommen ist, liegt zum einen daran, dass im zweiten Szenario (Manöver) kurze Streckenabschnitte (insgesamt weniger als 10 %) manuell gefahren wurden. Zum anderen kann es auch mit aktiviertem System zu einer Unterschreitung der Minimalzeitlücke von 1 s kommen, wenn beispielsweise ein „Fahrstreifenwechsel“ beauftragt wird und sich auf dem Zielfahrstreifen ein Fahrzeug befindet, das deutlich langsamer fährt, wird die Zeitlücke kurzzeitig unterschritten (Eintauchen).

Der rein visuelle Eindruck eines Unterschiedes zwischen der aggregierten Dauer der Unterschreitung der Zeitlücke von 0,5 s zwischen der manöverbasierten ($\mu = 1,79$ s; $\sigma = 3,00$ s) und der konventionellen Fahrt ($\mu = 15,96$ s; $\sigma = 20,13$ s) wird durch einen t-Test (abhängige Stichprobe) bestätigt ($t = -4,68$; $df = 39$; $p < 0,001$).

Systemverständnis In welchem Umfang die Versuchspersonen die Interaktion mit dem System verstanden hatten, wurde mit einem Fragebogen ermittelt. In den Fragen wurde nach dem Systemverhalten bei bestimmten Randbedingungen gefragt, die mit drei bis vier Antwortmöglichkeiten beantwortet werden sollten. Die Fragen mit den dazugehörigen Antwortmöglichkeiten sind im Anhang C dargestellt.

Die Ergebnisse sind in Abb. 46 dargestellt und zeigen, dass die Versuchspersonen die Interaktion weitestgehend verstanden hatten. Lediglich die Frage „Was passiert, wenn Sie auf das Gaspedal drücken?“ und die Frage „Wie können Sie nicht aus dem Manövermodus in den manuellen Modus wechseln?“ wurden häufig falsch beantwortet.

Bei den Falschantworten zu Frage A8 ist zu beachten, dass neun Probanden die Frage invertiert beantwortet haben. Dies weist darauf hin, dass die Frage aufgrund der Verneinung missverständlich formuliert war.

Die Falschantworten bei der Frage, was passieren würde, wenn man das Gaspedal betätigt, resultieren überwiegend aus der Antwortmöglichkeit „Es passiert nichts“ auf die Frage, was passieren würde, wenn während der Manöverführung das Gaspedal getreten würde. Diese Aktion ist von vielen Versuchspersonen gar nicht oder nur sehr selten durchgeführt worden, was die Ursache für die vielen Falschantworten sein kann.

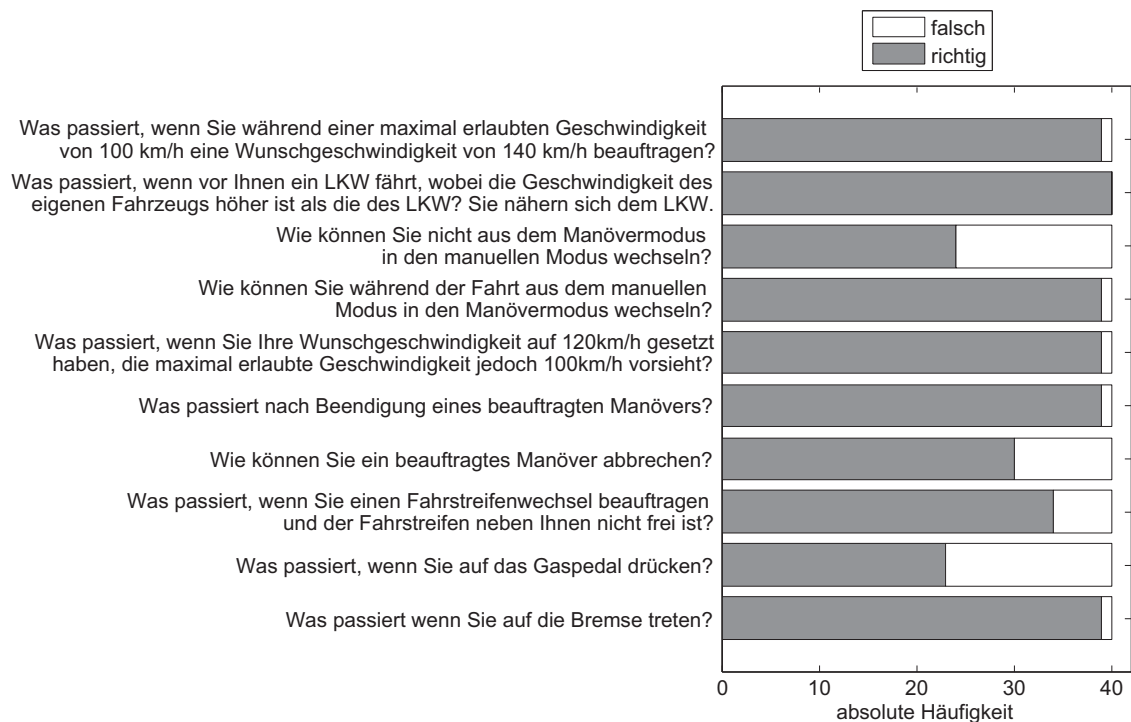


Abbildung 46: 10 Fragen zum Systemverständnis der manöverbasierten Fahrzeugführung (Fragebogen vgl. Anhang C), $N = 41$

Unfälle bei der Verringerung um einen Fahrstreifen In allen Versuchsszenarios wurden an verschiedenen Stellen Baustellen implementiert, die den linken Fahrstreifen unbefahrbar machten und somit einen Fahrstreifenwechsel erzwungen haben. In Abb. 47 sind die Ergebnisse hinsichtlich der Unfälle in der Situation der Baustelle dargestellt.

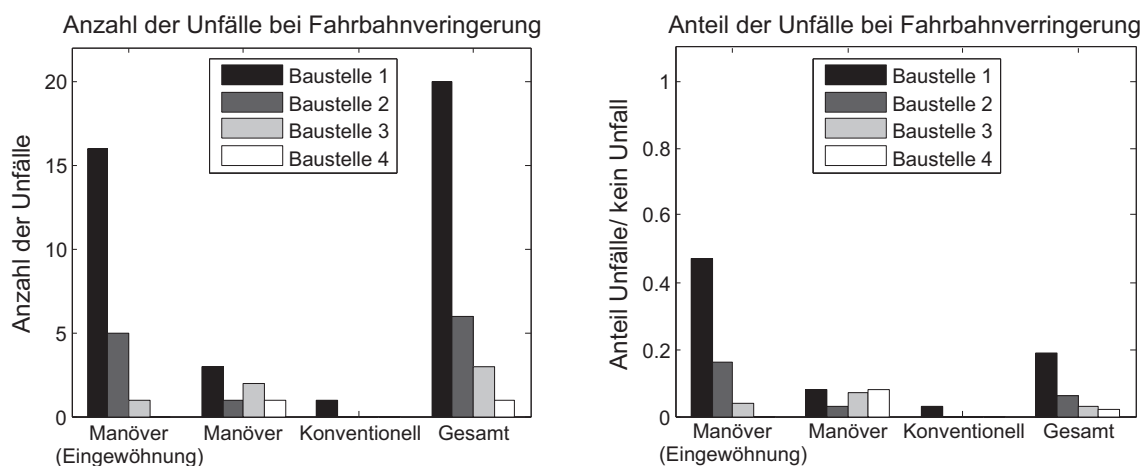


Abbildung 47: Anzahl der Unfälle aufgrund von durch Baustellen hervorgerufenen Fahrstreifenverengungen in absoluter Häufigkeit (links) und als Anteil von Fahrzeugen, die auf dem wegfallenden Fahrstreifen gefahren sind, ($N = 41$)

Ausnahmsweise ist neben den sonst verwendeten Szenarios „Manöver“ und „Konventionell“ die Eingewöhnungsfahrt mit aufgeführt. Es sollte ebenfalls dokumentiert werden, wie die Versuchspersonen auf das erste Auftreffen in einer Situation reagieren. Den Versuchspersonen wurde vor Versuchsbeginn nicht erklärt, wie das System in einer solchen Situation reagiert. Wie man in den Ergebnissen sehen kann (vgl. Abb. 47 links), haben in dem *Naive-Run* viele Unfälle stattgefunden. Diese Anzahl ist bei der zweiten und dritten Baustelle deutlich zurückgegangen, bei konventioneller Fahrzeugführung ist lediglich in Baustelle 1 ein einziger Unfall vorgekommen.

In Abb. 47 rechts ist zum Vergleich noch der Anteil an Unfällen relativ zu Fahrzeugen dargestellt, die auf dem Fahrstreifen fuhren, der durch die Baustelle wegfällt. Fahrzeuge, die andere Fahrstreifen befahren hatten, sind bei der Anteilerrechnung ausgeschlossen worden, da diese gar nicht in die Baustelle fahren konnten.

Subjektive Einschätzung der Verringerung der Beanspruchung In Abb. 48 ist die Häufigkeitsverteilung der Antworten der Versuchspersonen hinsichtlich der Frage nach einer Ent- oder Belastung durch die manöverbasierte Fahrzeugführung dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass der Modalwert bei einer Einstufung von 2 liegt, die Versuchspersonen also subjektiv den Eindruck hatten, dass sie durch die manöverbasierte Fahrzeugführung entlastet wurden. Insgesamt sind nur 2 von 41 Versuchspersonen der Meinung, dass eine Belastung durch das System entsteht.

Die Frage wurde auf einer fünfstufigen Likertskala von „starke Entlastung“ bis „starke Belastung“ beantwortet (vgl. Abb. 48). Die Ergebnisse werden mit einem Einstichproben-test für das arithmetische Mittel bei unbekannter Varianz der Grundgesamtheit untersucht (vgl. Bleymüller *et al.*, 2002, S. 108), wobei die Standardabweichung über die Stichprobe geschätzt wird. Aufgrund des Stichprobenumfangs von $N = 41$ wird wegen des zentralen Grenzwerttheorems eine Normalverteilung angenommen. In diesem t-Test wird überprüft, ob sich der Stichprobenmittelwert signifikant von 3 (weder eine Belastung, noch eine Entlastung) unterscheidet. Der Mittelwert der Stichprobe liegt bei $\mu = 1,90$ und führt zu einem höchst signifikanten Unterschied ($t = -9,56$; $df = 40$; $p < 0,001$) von der Mitte (3) hinsichtlich der Entlastung durch das System.

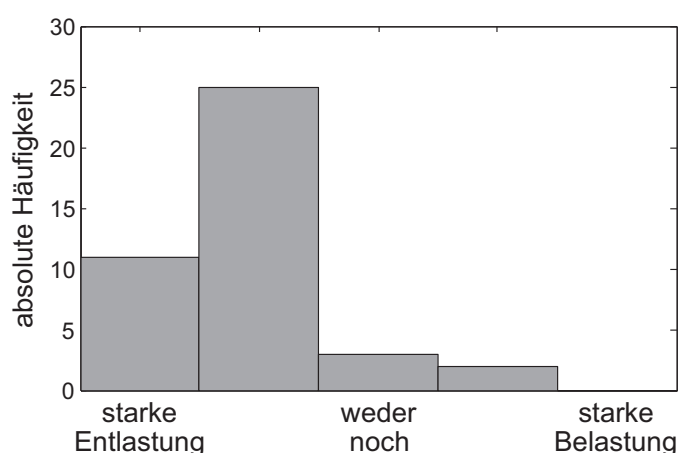


Abbildung 48: Histogramm zur Frage „Entlastet/Belastet Sie die manöverbasierte Fahrzeugführung im Vergleich zum normalen Fahren?“ auf einer fünfstufigen Likertskala von „starke Entlastung“ bis „starke Belastung“ ($N = 41$)

Manöverausführung und Erwartung an die Manöver Wie in der Frühkonzeptevaluierung mit Hilfe der *Wizard of Oz*-Technik, wurden die Versuchspersonen in der Fahrsimulatorstudie ebenfalls nach ihrer Meinung zur Manöverausführung sowie der Deckung mit ihren Erwartungen gefragt (vgl. Kapitel 3.3). Abb. 49 zeigt die Ergebnisse hinsichtlich der Manöverausführung. Die Fragen nach der Ausführung wurden auf einer 5-stufigen Likert-Skalen beantwortet, wobei der linke Pol der Skala mit „sehr angenehm“ (Zahlenwert=1) und der rechte Pol der Skala „sehr unangenehm“ (Zahlenwert=5) bezeichnet ist.

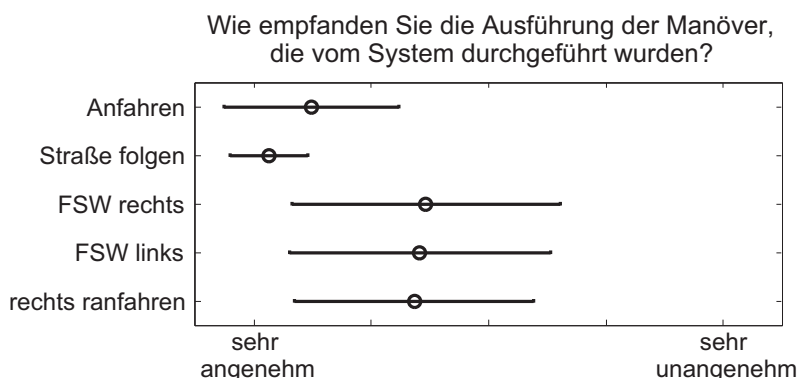


Abbildung 49: Subjektive Beurteilung der Manöverausführung ($N = 41$)

Das Manöver „Anfahren“, das im Normalfall nur zweimal während der Simulation vorkam, wurde mit einem Mittelwert von 1,49 ($\sigma = 0,75$) positiv beurteilt. Die Ergebnisse für das Manöver „Straße folgen“ fallen ebenfalls positiv aus ($\mu = 1,12$; $\sigma = 0,33$), obwohl es das Manöver ist, das sowohl auf die Zeit als auch auf die Strecke gerechnet die längste Aktivierung besitzt. Die Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“ ($\mu = 2,46$; $\sigma = 1,14$), „Fahrstreifenwechsel links“ ($\mu = 2,41$; $\sigma = 1,12$) und „rechts ranfahren“ ($\mu = 2,37$; $\sigma = 1,02$) liegen, was den Mittelwert als auch die Standardabweichung betrifft, auf einem sehr ähnlichen und nur mittelmäßigen Niveau. Neben der Ausführung ist auch nach der Deckung der Erwartungen der Versuchspersonen im Vergleich zu der tatsächlichen Ausführung gefragt worden (vgl. Abb. 50). Es zeigt sich generell ein der Ausführung ähnliches Bild. Die Manöver „Anfahren“ ($\mu = 1,27$; $\sigma = 0,59$) und „Straße folgen“ ($\mu = 1,10$; $\sigma = 0,30$) werden von den Versuchspersonen hinsichtlich der Erwartungskonformität positiv beurteilt.

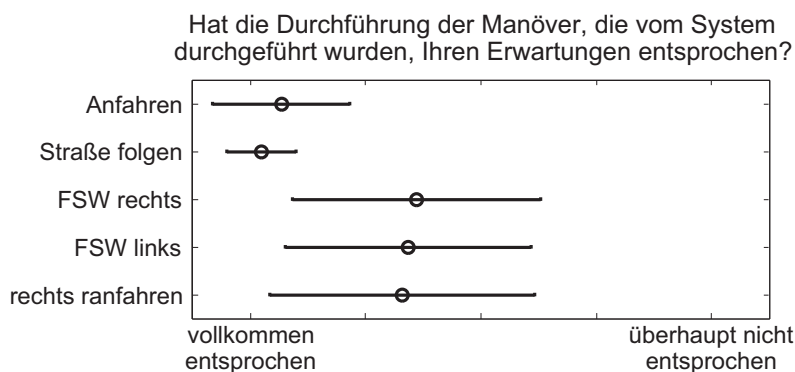


Abbildung 50: Subjektive Beurteilung der Erwartung an ein Manöver im Vergleich zur Ausführung im Fahrsimulator ($N = 41$)

Die restlichen Manöver erreichen erneut nur mittelmäßige Bewertungen („Fahrstreifenwechsel rechts“ ($\mu = 2,44; \sigma = 1,07$), „Fahrstreifenwechsel links“ ($\mu = 2,37; \sigma = 1,07$) und „rechts ranfahren“ ($\mu = 2,32; \sigma = 1,15$)).

Für ein sicheres Führen eines Fahrzeugs mit assistierenden Systemen ist es unerlässlich, dass der Fahrer weiß, in welchem Modus er sich befindet. Im Fall der manöverbasierten Fahrzeugführung ist dementsprechend wichtig, zu wissen, welches Manöver gerade ausgeführt wird und zu welchem Zeitpunkt ein neues Manöver durchgeführt wird. Dies wird subjektiv über die Fragen ermittelt, ob den Versuchspersonen immer klar ist, wann ein jeweiliges Manöver begonnen und wann es geendet hat.

In Abb. 51 sind die Ergebnisse nach der Eindeutigkeit des jeweiligen Manöverbeginns dargestellt. Die Manöver „Anfahren“ ($\mu = 1,34; \sigma = 0,62$) und „Straße folgen“ ($\mu = 1,12; \sigma = 0,33$) sind sehr positiv beurteilt worden. Hier war den Versuchspersonen klar, wann diese Manöver begonnen hatten. Die Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“ ($\mu = 2,00; \sigma = 0,97$), „Fahrstreifenwechsel links“ ($\mu = 1,95; \sigma = 0,92$) und „rechts ranfahren“ ($\mu = 2,10; \sigma = 1,04$) sind tendenziell ebenfalls positiv beantwortet worden, erreichen aber nicht die nahe am Optimum liegenden Werte der erstgenannten Manöver.

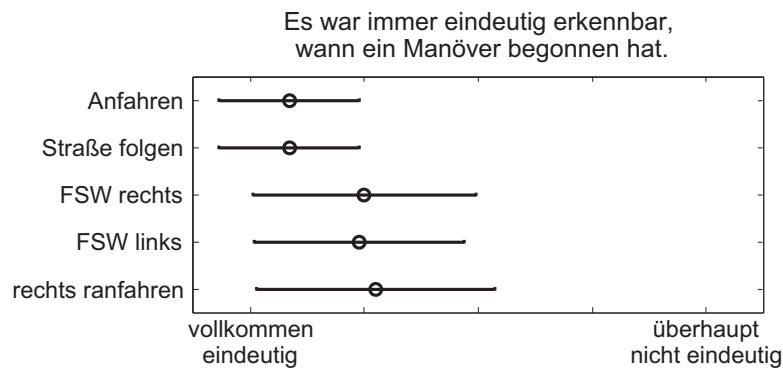


Abbildung 51: Subjektive Einschätzung der Versuchspersonen, ob der Beginn der Manöver immer eindeutig erkennbar war ($N = 41$)

Neben dem Beginn von Manövern kann ebenfalls nach der Eindeutigkeit des Manöverendes gefragt werden. Abb. 52 zeigt die Ergebnisse für die Frage nach der Eindeutigkeit des Manöverendes.

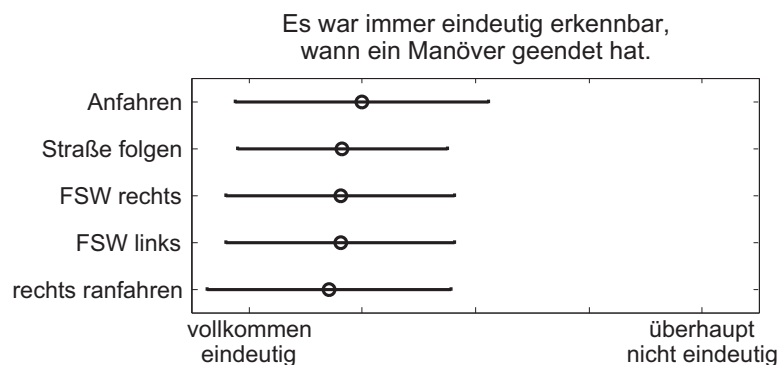


Abbildung 52: Subjektive Einschätzung der Versuchspersonen, ob das Ende der Manöver immer eindeutig erkennbar war ($N = 40$)

Die Manöver „Anfahren“ ($\mu = 2,00; \sigma = 1,12$) und „Straße folgen“ ($\mu = 1,83; \sigma = 0,93$) sind im Vergleich zum Manöverbeginn schlechter beurteilt worden. Die Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“ ($\mu = 1,81; \sigma = 1,01$), „Fahrstreifenwechsel links“ ($\mu = 1,81; \sigma = 1,01$) und „rechts ranfahren“ ($\mu = 1,71; \sigma = 1,08$) sind im Vergleich zum Manöverbeginn etwas besser eingeschätzt worden. Alle Manöver liegen deutlich im positiven Bereich.

In Abb. 53 sind die Ergebnisse der subjektiven Beurteilung der Wichtigkeit einzelner Fahrmanöver und Parameter angegeben. Die Manöver „Straße folgen“ ($\mu = 1,40; \sigma = 0,81$) sowie „Fahrstreifenwechsel rechts“ ($\mu = 1,61; \sigma = 0,80$) und „Fahrstreifenwechsel links“ ($\mu = 1,61; \sigma = 0,80$) sind nah am Extrem „sehr wichtig“ bewertet worden. Das Manöver „Anfahren“ ($\mu = 2,23; \sigma = 1,17$) ist etwas schlechter bewertet worden, das Manöver „rechts ranfahren“ ($\mu = 3,32; \sigma = 1,19$) deutlich schlechter. Die Parameter „Wunschabstand“ ($\mu = 1,81; \sigma = 0,98$) und „Wunschgeschwindigkeit“ ($\mu = 1,61; \sigma = 0,83$) sind beide für wichtig befunden worden, der Parameter „Exzentrizität“ ($\mu = 2,80; \sigma = 1,05$) als weder wichtig, noch unwichtig.

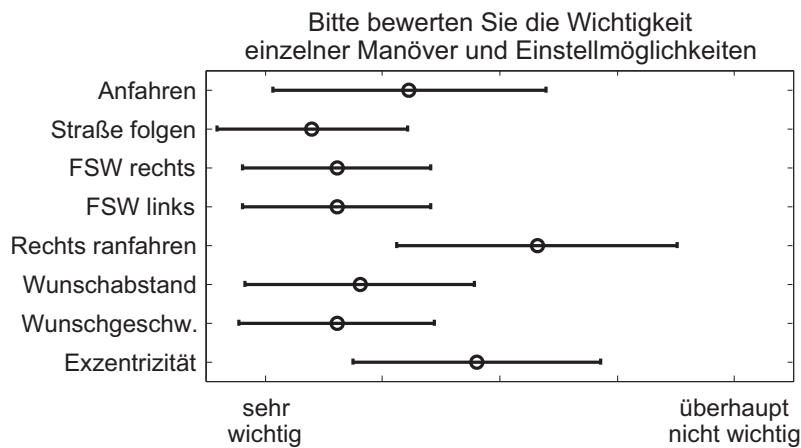


Abbildung 53: Bewertung der Wichtigkeit der Manöver und Parameter ($N = 41$)

Die Wichtigkeit der Manöver und Parameter ist jeweils mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) evaluiert worden, um herauszufinden, ob Unterschiede in der Einschätzung der Wichtigkeit der Manöver aus Sicht der Nutzer bestehen. Für die Manöver weist diese ANOVA einen höchst signifikanten Unterschied der Wichtigkeit auf ($F = 25,16; df = 4, p < 0,001$). In Nachgang sind die Manöver anhand von t-Tests für abhängige Stichproben auf signifikante Unterschiede untersucht worden. Die p -Werte der Manöver sind in Tab. 11 dargestellt.

Wegen des Problems der Erzeugung von Scheinsignifikanzen durch multiples Testen wird die Bonferroni-Korrektur angewendet (Bortz, 2005, S. 129), wonach hier nur signifikante Unterschiede vorliegen, wenn der p -Wert unter $0,005$ ($\alpha' = \frac{\alpha}{m} = \frac{0,05}{10} = 0,005$, wobei m die Anzahl der Tests ist, die durchgeführt werden müssen) liegt. Nach den Ergebnissen unterscheiden sich die Manöver „Straße folgen“, „Fahrstreifenwechsel (rechts)“ und „Fahrstreifenwechsel (links)“ nicht. Es liegen allerdings signifikante Unterschiede dieser Gruppe zu den anderen beiden Manövern „Anfahren“ und „rechts ranfahren“ vor. Es liegt ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden letztgenannten Manövern vor.

	Anfahren	Straße folgen	FSW (links)	FSW rechts	rechts ranfahren
Anfahren	—	< 0,001	0,0017	0,0017	< 0,001
Straße folgen	< 0,001	—	0,152	0,152	< 0,001
FSW (links)	0,0017	0,152	—	1,000	< 0,001
FSW rechts	0,0017	0,152	1,000	—	< 0,001
rechts ranfahren	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	—

Tabelle 11: p -Werte für die Unterschiede der subjektiv eingeschätzten Wichtigkeit der Fahrmanöver ($N = 41$); Reihung der Wichtigkeit: *Straße folgen* = *FSW (links)* = *FSW (rechts)* > *Anfahren* > *rechts ranfahren*

Die Wichtigkeit der Parameter ist ebenfalls mit einer einfaktoriellen ANOVA überprüft worden, die einen höchst signifikanten Unterschied aufweist ($F = 18,28$; $df = 2$; $p < 0,001$). Anschließend sind die einzelnen Parameter gegeneinander getestet worden, deren Ergebnisse in Tab. 12 dargestellt sind. Hier ist wieder die Bonferroni-Korrektur anzuwenden. Das korrigierte Signifikanzniveau ist $\alpha = \frac{0,05}{3} = 0,017$. Zwischen dem „Wunschabstand“ und der „Wunschgeschwindigkeit“ besteht kein signifikanter Unterschied, der Parameter „Exzentrizität“ unterscheidet sich allerdings höchst signifikant von den beiden anderen.

	Wunschabstand	Wunschge- schwindigkeit	Exzentrizität
Wunschabstand	—	0,308	< 0,001
Wunschge- schwindigkeit	0,308	—	< 0,001
Exzentrizität	< 0,001	< 0,001	—

Tabelle 12: p -Werte für die Unterschiede der subjektiv eingeschätzten Wichtigkeit der Parameter ($N = 41$); Reihung der Wichtigkeit: *Wunschabstand* = *Wunschgeschwindigkeit* > *Exzentrizität*

Beanspruchungsskalen nach dem NASA-TLX ZEIS In Abb. 54 sind die Ergebnisse der 6 Einzelfragen des NASA-TLX ZEIS dargestellt. Die geistige Anforderung (Abb. 54 oben links), liegt für die konventionelle Fahrzeugführung, wie aufgrund der vergleichsweise einfachen Strecke erwartet, auf einem niedrigen Niveau ($\mu = 6,05$; $\sigma = 2,92$). Die manöverbasierte Fahrzeugführung liegt etwas niedriger ($\mu = 5,29$; $\sigma = 2,39$), ist jedoch nicht signifikant unterschiedlich von der konventionellen Fahrt ($t = -1,69$; $df = 40$; $p = 0,099$). Der Vergleich der subjektiv empfundenen physischen Belastung über die Subskala „Kör-

perliche Anforderung“ des NASA-TLX ZEIS zeigt, dass ein höchst signifikanter Unterschied vorliegt ($t = -4,23$; $df = 40$; $p < 0,001$). Da der Mittelwert der „Körperlichen Anforderung“ für den manöverbasierten Fall ($\mu = 3,32$; $\sigma = 1,94$) kleiner ist als bei der konventionellen Fahrzeugführung ($\mu = 5,28$; $\sigma = 2,76$) liegt eine Reduzierung der „Körperlichen Anforderung“ durch die Manöverführung vor. Sowohl die konventionelle als auch die manöverbasierte Fahrzeugführung liegen auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau.

Die „Zeitliche Anforderung“ zeigt ebenfalls für beide Interaktionsarten niedrige Werte. Die manöverbasierte Fahrzeugführung ($\mu = 4,61$; $\sigma = 2,46$) weist allerdings eine geringere Spannweite und Standardabweichung als die konventionelle ($\mu = 4,72$; $\sigma = 3,00$) aus. Die Unterschiede werden nicht signifikant ($t = -0,23$; $df = 40$; $p = 0,822$).

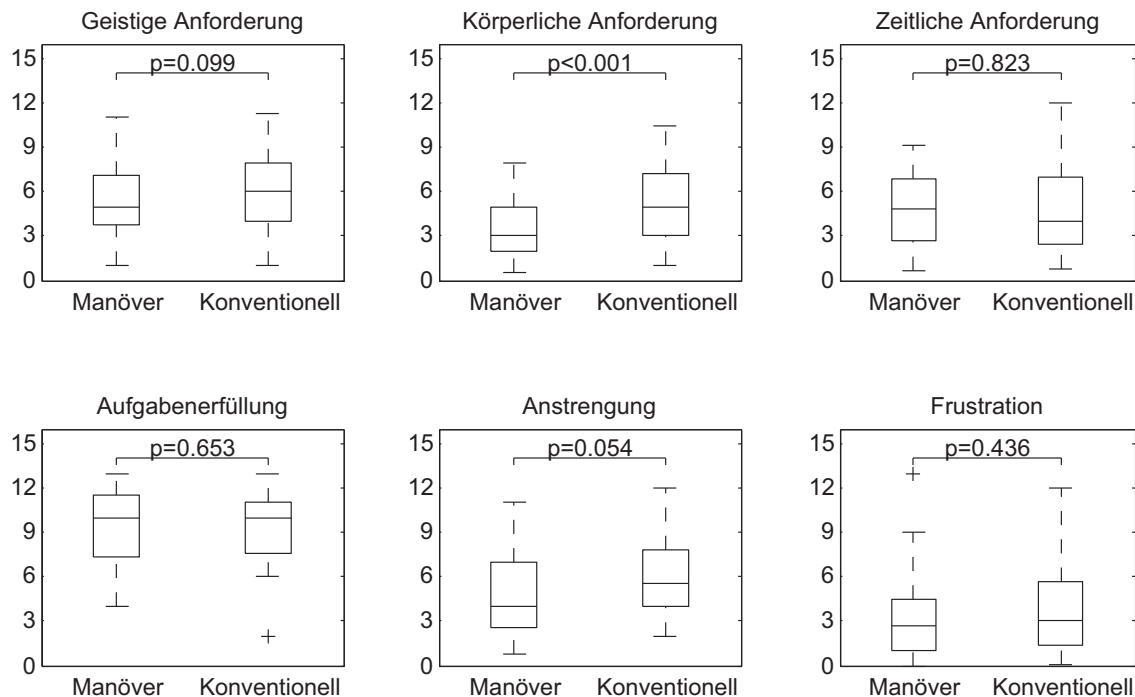


Abbildung 54: Ergebnisse der Skalen „Geistige Anforderungen“ ($N = 41$), „Körperliche Anforderungen“ ($N = 41$), „Zeitliche Anforderung“ ($N = 41$), „Aufgabenerfüllung“ ($N = 41$), „Anstrengung“ ($N = 41$) und „Frustration“ ($N = 40$) des NASA-TLX ZEIS mit den entsprechenden p -Werten der t -Tests hinsichtlich des Unterschiedes zwischen der konventionellen Fahrzeugführung (Konventionell) und der manöverbasierten Fahrzeugführung (Manöver)

Die „Aufgabenerfüllung“ ist sowohl für die manöverbasierte ($\mu = 9,34$; $\sigma = 2,37$) als auch für die konventionelle Fahrzeugführung ($\mu = 9,50$; $\sigma = 2,27$) im mittleren bis oberen Bereich einzuordnen. Auch hier werden die Unterschiede nicht signifikant ($t = -0,45$; $df = 40$; $p = 0,653$). Die wahrgenommene „Anstrengung“ zeigt ebenfalls keinen signifikanten Unterschied ($t = -1,98$; $df = 40$; $p = 0,054$) zwischen der konventionellen ($\mu = 4,69$; $\sigma = 2,42$) und der manöverbasierten Fahrzeugführung ($\mu = 5,82$; $\sigma = 2,66$). Da p nahe der Signifikanzgrenze von 0,05 ist, kann von einem Trend gesprochen werden, dass eine Verringerung der „Anstrengung“ durch die manöverbasierte Fahrzeugführung vorliegt. Die vom Fahrer erlebte „Frustration“, gemessen über den NASA TLX ZEIS,

unterscheidet sich zwischen der konventionellen ($\mu = 3,82; \sigma = 2,93$) und der manöverbasierten Fahrzeugführung ($\mu = 3,36; \sigma = 2,83$) nicht ($t = -0,79; df = 39; p = 0,437$).

Subjektivurteile zum manöverbasierten Fahrzeugführungskonzept Um den subjektiven Eindruck der Versuchspersonen zu erfassen, wurden die Versuchspersonen nach den Versuchsfahrten gebeten, allgemeine Fragen (Fragebogen) zur manöverbasierten Fahrzeugführung zu beantworten. In Abb. 55 ist die Bewertung der Versuchspersonen hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Systems angegeben. Trotz der Systemausfälle und der relativ hohen Anzahl an Unfällen (vgl. Abb. 47) wird das System mittelmäßig mit einer Tendenz zu „zuverlässig“ eingestuft ($\mu = 2,61; \sigma = 0,95$, wobei 1 „sehr zuverlässig“ und 5 „überhaupt nicht zuverlässig“ bedeutet).

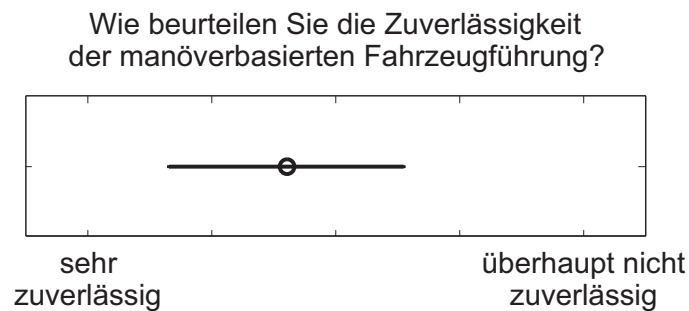


Abbildung 55: Subjektive Bewertung der Versuchspersonen hinsichtlich der Zuverlässigkeit des Systems ($N = 41$)

Die Aufmerksamkeit des Nutzers ist für teilautonome Systeme von besonderer Bedeutung. Neben den objektiven Kennwerten (vgl. *Situation Awareness* in Kapitel 4.5.3) wurden die Versuchspersonen aufgefordert, eine subjektive Beurteilung der Konzentrationsveränderung durch das manöverbasierte Fahren im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung abzugeben (vgl. Abb. 56). Die Ergebnisse zeigen, dass eine subjektiv stark empfundene Reduktion der Aufmerksamkeit vorliegt ($\mu = 1,71; \sigma = 0,78$; 1=starke Reduktion, 3 = weder Reduktion, noch Erhöhung, 5 = starke Erhöhung).

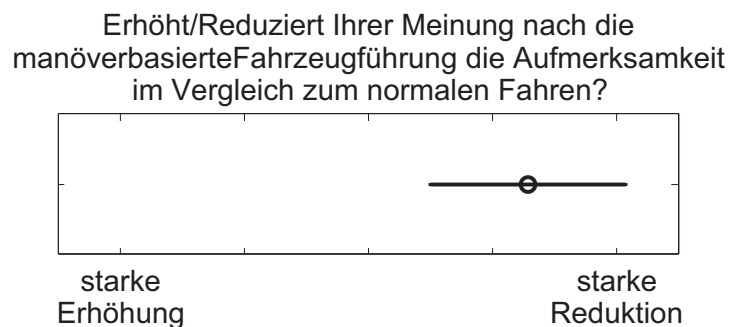


Abbildung 56: Subjektive Einschätzung der Veränderung der Aufmerksamkeit ($N = 41$)

Die Ergebnisse werden mit einem Einstichprobentest für das arithmetische Mittel bei unbekannter Varianz der Grundgesamtheit untersucht (vgl. Bleymüller *et al.*, 2002, S. 108), wobei die Standardabweichung über die Stichprobe geschätzt wird. Es wird von der Mitte

der Skala (weder eine Reduktion, noch eine Erhöhung) ausgegangen und getestet, ob die Verteilung der Ergebnisse zu dieser Frage einen von der Mitte signifikant unterschiedlichen Wert liefert. Der t-Test zeigt einen höchst signifikanten Unterschied ($t = -10,58$; $df = 40$; $p < 0,001$). Eine subjektiv wahrgenommene Verringerung der Aufmerksamkeit liegt vor.

Fahrerassistenzsysteme verfolgen neben dem Sicherheitsgewinn auch das Ziel der Komfortsteigerung, die ebenfalls von den Versuchspersonen bewertet worden ist. In Abb. 57 ist ein deutlicher subjektiv beurteilter Komfortgewinn zu erkennen ($\mu = 4,22$; $\sigma = 0,82$; 1=starke Reduktion, 3=weder Reduktion noch Erhöhung, 5=starke Erhöhung). Der Einstichprobentest für das arithmetische Mittel bei unbekannter Varianz der Grundgesamtheit zeigt einen höchst signifikanten Unterschied des Mittelwertes der Stichprobe von der Mitte (3=weder Reduktion noch Erhöhung) der Skala ($t = 9,50$; $df = 40$; $p < 0,001$).

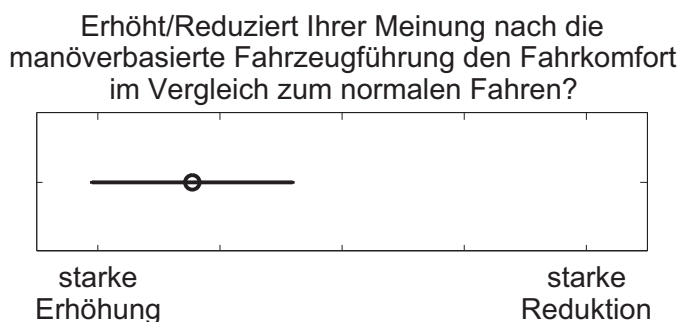


Abbildung 57: Subjektive Bewertung der Veränderung des Fahrkomforts ($N = 41$)

Es wurde ebenfalls der Kontrollverlust ermittelt, den die Versuchspersonen empfunden haben. In Abb. 58 ist das Ergebnis dargestellt. Es liegt ein deutlicher Unterschied ($\mu = 2,85$; $\sigma = 1,20$) zum Pol „stimme überhaupt nicht zu“ (= 1) vor. Dies lässt darauf schließen, dass ein Kontrollverlust stattgefunden haben muss.

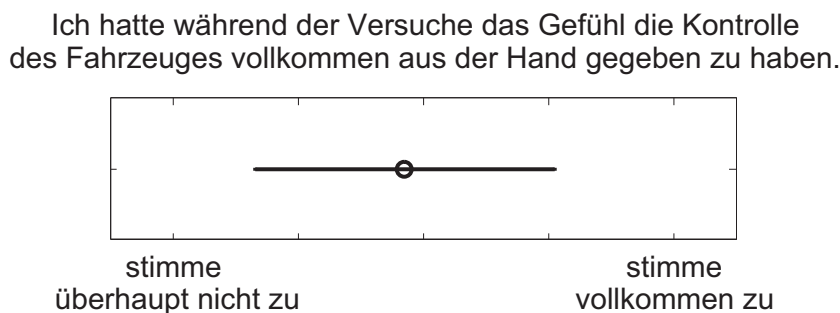


Abbildung 58: Subjektive Beurteilung des Kontrollverlusts ($N = 41$)

Trotz der aufgetretenen Unfälle und Systemausfälle wurde die Sicherheitsveränderung durch die manöverbasierte Fahrzeugführung als Erhöhung wahrgenommen. Abb. 59 zeigt eine leichte Verschiebung zum Pol „starke Erhöhung“ ($\mu = 3,37$; $\sigma = 0,97$). Ein Einstichprobentest gegen die Mitte der Skala (=3) zeigt einen signifikanten Unterschied ($t = 2,42$; $df = 40$; $p = 0,020$).

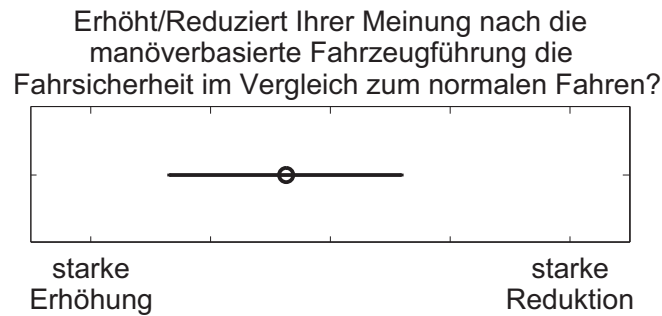


Abbildung 59: Subjektive Beurteilung der Sicherheitsveränderung zwischen der manöverbasierten und der konventionellen Fahrzeugführung ($N = 41$)

4.5.2 Allgemeine Ergebnisdarstellung „Novizen“ ($N = 15$)

In diesem Kapitel werden ausgewählte Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie mit den Novizen dargestellt. Da es sich bei dieser Versuchsreihe um eine Nebenversuchsreihe handelt, wird im Vergleich zur Studie der erfahrenen Fahrer nur eine Auswahl an Kenngrößen vorgestellt, die für die Evaluation der manöverbasierten Fahrzeugführung besonders wichtig sind. Es wird sich daher auf die Kenngrößen hinsichtlich der Blickbewegung, der Häufigkeit der Manöver- und Parameterinteraktion, der Beanspruchung gemessen über den NASA-TLX ZEIS sowie ausgewählte Subjektivurteile beschränkt.

Blickbewegung Die Blickbewegung ist wie bei der Versuchsreihe der Erfahrenen für die zweite (Manöver) und dritte Fahrt (Konventionell) ausgewertet worden. Die Eingewöhnungsfahrt wurde nicht in die Auswertung miteingeschlossen. In Abb. 60 ist die Blickzuwendungshäufigkeit dargestellt. Auch hier wurden die Verteilungen zunächst auf Normalverteilung überprüft. Die Ergebnisse des Lilliefors-Tests und des Shapiro-Wilk-Tests sind in Tab. 13 dargestellt. Liegt einer der Werte unterhalb von 0,05, kann nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

Interessenbereiche (AOI)	Manöverbasierte Fahrzeugführung		Konventionelle Fahrzeugführung	
	Lilliefors-Test	Shapiro-Wilk-Test	Lilliefors-Test	Shapiro-Wilk-Test
Straße	0,500	0,666	0,144	0,125
Fahrstreifenmarkierung	0,027	0,054	0,197	0,322
Verkehrszeichen	0,500	0,890	0,500	0,282
Umwelt	0,002	0,012	0,500	0,438
Tachometer	0,500	0,812	0,202	0,143
Rückspiegel	0,457	0,362	0,087	0,240
Touchscreen	0,366	0,157	-	-
Head-Up-Display	0,500	0,373	-	-

Tabelle 13: Signifikanzwerte (p -Werte) des Tests auf Normalverteilung nach dem Lilliefors-Test und dem Shapiro-Wilk-Test für die Verteilung der Blickzuwendungshäufigkeiten in der Versuchsreihe der Novizen ($N = 14$)

Die Blickzuwendungshäufigkeit zu den AOI „Straße“, „Verkehrszeichen“, „Tachometer“, „Rückspiegel“, „Touchscreen“ und „Head-Up-Display“ wurde mit t-Tests (abhängige Stichprobe) untersucht, die AOI „Fahrstreifenmarkierung“ und „Umwelt“ mussten aufgrund der nicht normalverteilten Daten mit dem Wilcoxon-Test ausgewertet werden. Die Mittelwerte können der Abb. 60 entnommen werden. Des Weiteren sind die verschiedenen AOI, die einen signifikanten Unterschied zwischen Manöverführung und konventioneller Fahrzeugführung aufweisen, mit Sternen markiert.

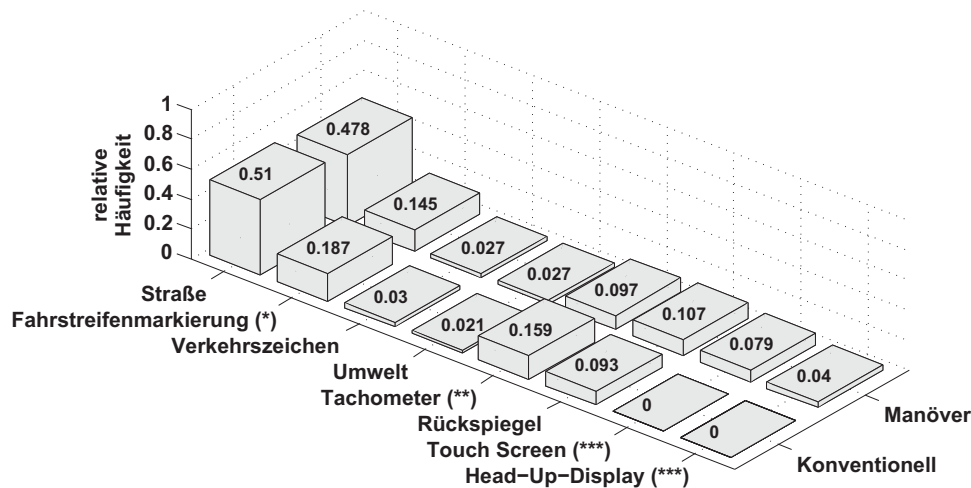


Abbildung 60: Blickzuwendungshäufigkeitsverteilung der Novizen ($N = 14$); (*)=signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,05$), (**) =hoch signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,01$), (***)=höchst signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,001$)

Dass ein höchst signifikanter Unterschied bei der Blickzuwendungshäufigkeit zum Touchscreen ($t = 12,59$; $df = 13$; $p < 0,001$) und zum Head-Up-Display ($t = 9,13$; $df = 13$; $p < 0,001$) vorliegt, ist nicht überraschend, da diese AOI in der konventionellen Fahrt nicht vorhanden waren. Wie bei den erfahrenen Fahrern führt die Verwendung der manöverbasierten Fahrzeugführung auch bei den Novizen zu einer hoch signifikanten Reduzierung der Blickzuwendungshäufigkeit zum „Tachometer“ ($t = 3,22$; $df = 13$; $p = 0,007$).

Ebenfalls lässt sich bei manöverbasierter Fahrzeugführung eine Reduktion der Blickzuwendungshäufigkeit zu den „Fahrstreifenmarkierungen“ feststellen ($WX = 14$; $df = 13$; $p = 0,0134$). Alle anderen AOI weisen keine signifikanten Unterschiede in der relativen Blickzuwendungshäufigkeit auf.

Das Ergebnis der relativen Blickzuwendungsdauer ist in Abb. 61 dargestellt. Die AOI „Straße“, „Verkehrszeichen“, „Tachometer“ und „Head-Up-Display“ wurden mit t-Tests (abhängige Stichprobe) untersucht, die AOI „Fahrstreifenmarkierung“, „Umwelt“, „Rückspiegel“ und „Touchscreen“ mussten aufgrund der nicht normalverteilten Daten (vgl. Tab. 14) mit dem Wilcoxon-Test ausgewertet werden. Die verschiedenen AOI, die einen signifikanten Unterschied zwischen Manöverführung und konventioneller Fahrzeugführung aufweisen sind mit Sternen markiert.

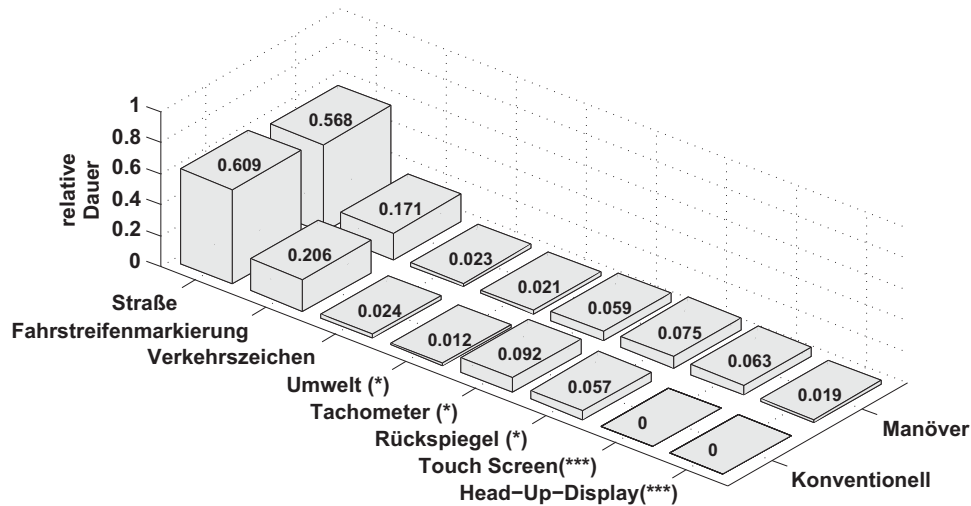


Abbildung 61: Relative Blickzuwendungsdauer der Novizen ($N = 14$) bei konventioneller und manöverbasierter Fahrzeugführung; (*)=signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,05$), (**) =hoch signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,01$), (***)=höchst signifikanter Unterschied ($\alpha \leq 0,001$)

Höchst signifikante Unterschiede sind, wie erwartet, wieder bei den AOI „Touchscreen“ ($WX = 0$; $df = 13$; $p < 0,001$) und „Head-Up-Display“ ($t = 8,51$; $df = 13$; $p < 0,001$) zu finden, da in der Fahrt mit konventioneller Fahrzeugführung diese AOI nicht vor kamen.

Interessenbereiche (AOI)	Manöverbasierte Fahrzeugführung		Konventionelle Fahrzeugführung	
	Lilliefors-Test	Shapiro-Wilk-Test	Lilliefors-Test	Shapiro-Wilk-Test
Straße	0,500	0,158	0,500	0,195
Fahrstreifenmarkierung	0,050	0,025	0,124	0,372
Verkehrszeichen	0,486	0,463	0,140	0,177
Umwelt	0,003	0,001	0,500	0,888
Tachometer	0,479	0,100	0,337	0,344
Rückspiegel	0,083	0,019	0,265	0,130
Touchscreen	0,100	0,008	-	-
Head-Up-Display	0,500	0,477	-	-

Tabelle 14: Signifikanzwerte (p -Werte) des Test auf Normalverteilung nach dem Lilliefors-Test und den Shapiro-Wilk-Test für die Verteilung der Blickzuwendungsdauern in der Versuchsreihe der Novizen ($N = 14$)

Im Gegensatz zur relativen Blickzuwendungshäufigkeit ist für die relative Blickzuwendungsdauer ein signifikanter Unterschied der zentralen Tendenz zum „Rückspiegel“ festzustellen ($WX = 20$, $p = 0,042$). Der Anteil liegt im manöverbasierten Fall höher als bei konventioneller Fahrzeugführung. Die Blickzuwendungsdauer zum „Tachometer“ unterscheidet sich ebenfalls signifikant zwischen der manöverbasierten und der konventionellen Fahrt ($t = -2,34$; $df = 13$; $p = 0,036$). Die Versuchspersonen schauten bei konventioneller Fahrzeugführung länger auf den Tachometer.

Ein signifikanter Unterschied zeigt sich in der zentralen Tendenz der Blickzuwendungsdauer zur Umwelt ($WX=21$, $p=0,049$). Die relative Dauer ist allerdings sehr niedrig, so dass der signifikante Unterschied für die Bewertung des Systems nicht von tragender Rolle ist.

Bei der Blickzuwendungsdauer zum Touchscreen ist darüber hinaus eine Veränderung über die Zeit festzustellen. Die Daten sind in vier Teile entlang der Strecke (Teil 1: 0–15 km, Teil 2: 16–30 km, Teil 3: 31–45 km, Teil 4: 46–60 km) aufgeteilt worden. Im ersten Streckenabschnitt wurde noch 4,78 % der Zeit auf den Touchscreen geschaut, was sich im Anschluss auf einen Wert um 3,5 % einstellte (Teil 2: 3,42 %, Teil 3: 3,44 %, Teil 4: 3,57 %). Dies kann auf einen Lerneffekt hinsichtlich der Akquirierung von visuellen Informationen während der Nutzung der manöverbasierten Fahrzeugführung hindeuten.

Manöver- und Parameterinteraktion Wie in der Versuchsreihe der erfahrenen Fahrer ist die Interaktionshäufigkeit auch bei den Novizen mit dem System aufgezeichnet und ausgewertet worden. Die Ergebnisse hinsichtlich der Häufigkeit der Beauftragung von Manövern und Parametern, aufgetragen über die Strecke in 1000-m-Abschnitten, ist in Abb. 62 dargestellt.

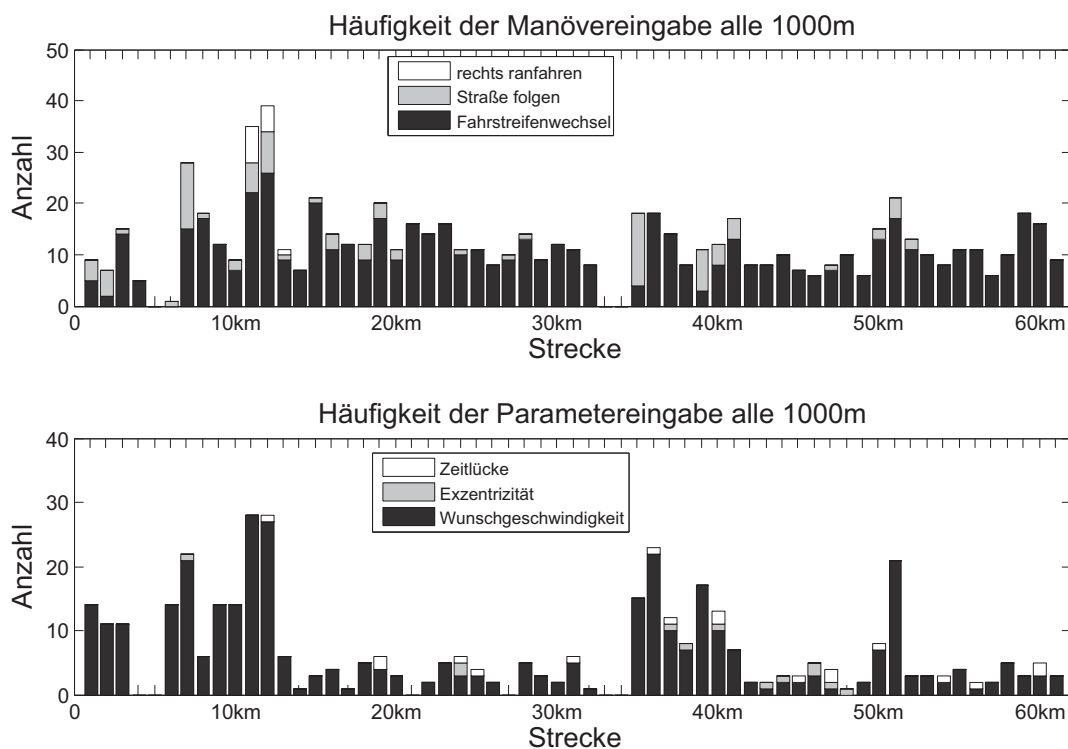


Abbildung 62: Manöveranzahl pro 1000 m im Versuch der Novizen ($N = 15$)

Außer in den Bereichen 5 km und 33–34 km, in denen die Versuchspersonen aufgefordert waren, manuell zu fahren, sind immer Manöver beauftragt worden. Des Weiteren ist gegen Ende der Fahrt weiterhin mit dem System interagiert worden, da immer noch ca. 10 Manöver pro km, aggregiert über alle Versuchspersonen, gegeben wurden. Die Verteilung der Beauftragung von Parametern ist nicht im gleichen Maße homogen wie die der Manöver. Im Bereich 6–12 km und 35–41 km sind mehr Parameter beauftragt wor-

den als im Rest des Szenarios. Oft steht die Beauftragung eines Manövers „Straße folgen“ in direktem Zusammenhang mit dem Parameter „Wunschgeschwindigkeit“. Ist das System durch die Betätigung des Manövers „Straße folgen“ aktiviert worden, wird die gerade vorliegende Geschwindigkeit als Wunschgeschwindigkeit gespeichert. In vielen Fällen wurde direkt nach der Aktivierung die Wunschgeschwindigkeit angepasst. Insgesamt werden, wie bei den erfahrenen Fahrern, deutlich weniger Parameter als Manöver beauftragt. Insgesamt wurden 627 Fahrstreifenwechsel von den 15 Novizen beauftragt. Die beiden anderen Manöver „Straße folgen“ und „rechts ranfahren“ wurden nur punktuell und mit 13-mal („rechts ranfahren“) und 96-mal („Straße folgen“) deutlich seltener beauftragt.

Durchschnittlich wurden $12,07 \frac{\text{Manöver}}{\text{km}}$ ($\sigma = 21,46 \frac{\text{Manöver}}{\text{km}}$) oder $0,80 \frac{\text{Manöver}}{\text{km} \cdot \text{Versuchsperson}}$ beauftragt. Die Anzahl der tatsächlich ausgeführten Manöver kann sich davon unterscheiden, da ein Manöverauftrag nur durchgeführt wird, wenn der Zielfahrstreifen frei ist. Außerdem sind im Szenario, in dem die Manöverführung getestet wurde, auch kurze Abschnitte konventionell absolviert worden. Die tatsächliche Anzahl an Fahrstreifenwechseln in diesem Szenario liegt bei 721. Im Szenario der konventionellen Fahrzeugführung wurden auf der gleichen Strecke mit dem gleichen Verkehrsaufkommen 1 048 Fahrstreifenwechsel durchgeführt. Sowohl für die Stichprobe der manöverbasierten Fahrzeugführung (Lilliefors-Test: $KS = 0,11$; $p = 0,50$; Shapiro-Wilk-Test: $SW = 0,98$; $p = 0,94$) als auch bei der konventionellen Fahrt (Lilliefors-Test: $KS = 0,29$; $p = 0,295$; Shapiro-Wilk-Test: $SW = 0,88$; $p = 0,056$) liegt eine Normalverteilung vor. Der Unterschied wurde daher mit einem t-Test für gepaarte Stichproben untersucht und zeigt einen hoch signifikanten Unterschied ($t = -3,78$; $df = 14$; $p = 0,002$). Die Manöverführung hat demnach auch bei den Novizen zu einer Reduzierung von Fahrstreifenwechseln geführt.

Neben der Auswertung über die Strecke ist die Häufigkeit der Manövereingaben pro Versuchsperson ausgewertet worden, um sicherzustellen, dass ein Teil der Fahrer das Assistenzsystem nicht als Autopiloten verwendet und sich nach einer Aktivierung gänzlich aus der Fahraufgabe zurückzieht.

In Abb. 63 sind die Häufigkeiten der Manövereingaben (oben) und Parametereingaben (unten) dargestellt. Die Anzahl bei den Manövern ist bis auf die Versuchspersonen 2, 13 und 14 sehr homogen. Die drei genannten Versuchspersonen haben deutlich weniger Manöver beauftragt, wobei nur Proband Nr. 2 ebenfalls wenige Parameter eingegeben und sich somit tatsächlich nicht stark an der Bahnführung des Fahrzeugs beteiligt hat.

Wie bei den Manövern gibt es auch bei den Novizen Parameter, die wesentlich häufiger beauftragt werden als andere. Insgesamt wurde 376-mal die „Wunschgeschwindigkeit“ geändert, 12-mal eine „Exzentrizität“ beauftragt und 18 Anpassungen der Zeitlücke („Wunschabstand“) vorgenommen. Die „Exzentrizität“ wurde somit weniger als ein Mal pro Fahrt und Versuchsperson verwendet. Die homogene Verteilung der Manöver über die Versuchstrecke ist bei den Parametern nicht wiederzufinden. Speziell im Bereich zwischen der Kilometermarke 35 und 40 sind deutlich mehr Anpassungen der Wunschgeschwindigkeit gemacht worden. Die Ursache liegt hier in der Veränderung der Umwelteinflüsse, da in diesem Bereich Nebel mit einer Sichtweite von 50 m bewältigt werden musste. Dies veranlasste viele der Versuchspersonen zu einer Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit, die während der Manöverführung nur über eine Veränderung der Wunschgeschwindigkeit erreicht werden konnte.

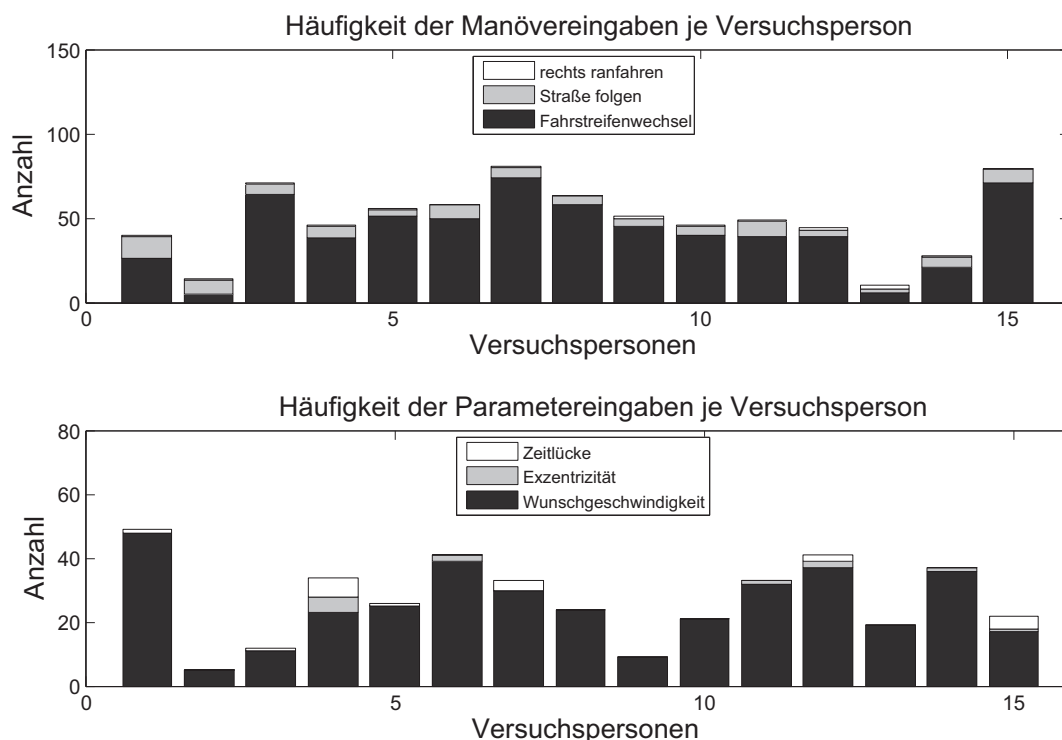


Abbildung 63: Anzahl der Manöver pro Versuchspersonen im Versuch „Novizen“ ($N = 15$)

Beanspruchungsskalen nach dem NASA-TLX ZEIS Die Beanspruchung der Novizen ist, wie in der Versuchsreihe der erfahrenen Fahrer (vgl. Kapitel 4.5.1), ebenfalls mit dem NASA-TLX ermittelt worden. Die Ergebnisse sind in Abb. 64 dargestellt.

Die statistische Auswertung erfolgt an dieser Stelle im Vergleich zur Versuchsreihe der erfahrenen Fahrer in einer leicht abgewandelten Form, da aufgrund der Stichprobengröße von $N = 15$ nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann. Für jede der sechs Skalen ist sowohl für die Manöverführung als auch für die konventionelle Fahrzeugführung auf Normalverteilung geprüft worden. Für den Test auf Normalverteilung wurden der Lilliefors-Test und der Shapiro-Wilk-Test verwendet. Wenn einer der beiden Tests zeigte, dass nicht von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurden nichtparametrische Tests angewandt. Es ist der Wilcoxon-Test verwendet worden. Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung sind in Tab. 15 dargestellt. Die Tests zeigen, dass die Skalen „Geistige Anforderungen“, „Aufgabenerfüllung“ und „Frustration“ entweder bei der manöverbasierten oder der konventionellen Fahrzeugführung nicht normalverteilt sind und daher mit dem Wilcoxon-Test ausgewertet wurden. Die restlichen Skalen können aufgrund der Normalverteilung mit einem t-Test für abhängige Stichproben untersucht werden.

Die „Geistige Anforderung“ liegt für den manöverbasierten Fall ($\mu = 4,50$; $\sigma = 3,03$) niedriger als bei konventioneller Fahrzeugführung ($\mu = 6,61$; $\sigma = 3,48$). Der Wilcoxon-Test weist einen p -Wert von 0,05005 aus ($WX = 17,50$; $p = 0,050$) und zeigt somit, wenn auch sehr knapp, dass es keinen Unterschied in der zentralen Tendenz der „Geistigen Anforderung“ gibt.

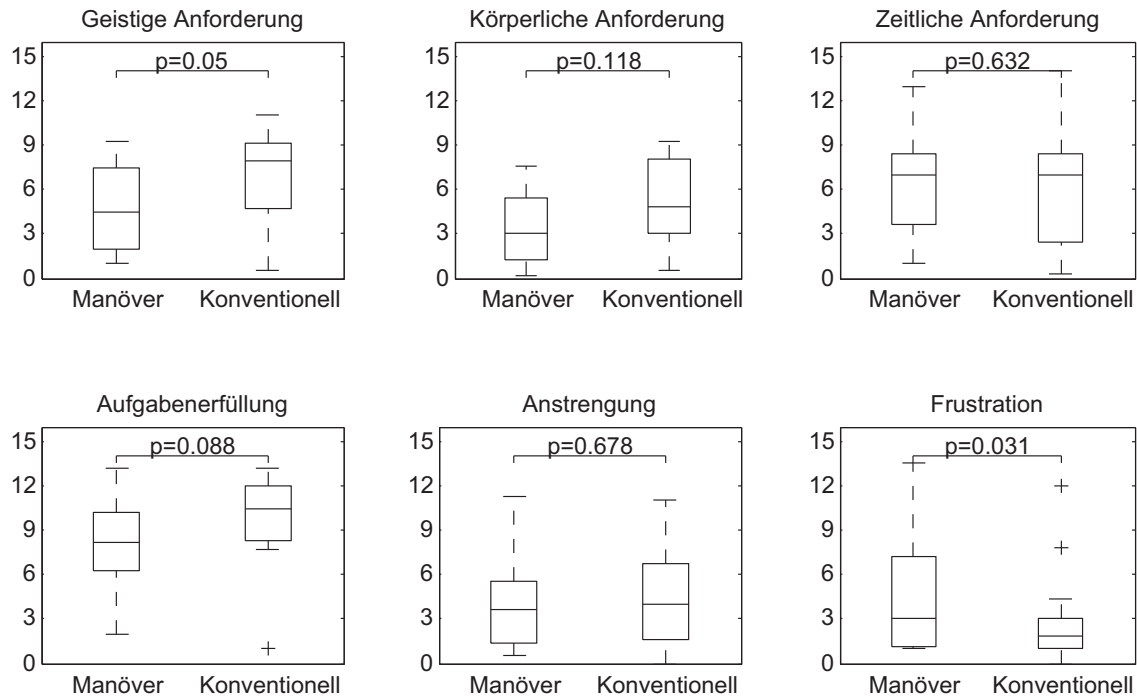


Abbildung 64: Ergebnisse des NASA-TLX ZEIS für die Versuchsreihe der Novizen ($N = 15$); statistische Unterschiede wurden für die „Geistigen Anforderungen“, die „Aufgabenerfüllung“ und die „Frustration“ mit einem Wilcoxon-Test evaluiert, da keine Normalverteilungen vorlagen; die restlichen Vergleiche konnten mit t-Tests für abhängige Stichproben untersucht werden.

Die „Körperlichen Anforderungen“ zeigen im Gegensatz zu den erfahrenen Fahrern (vgl. Abb. 54) keinen signifikanten Unterschied ($t = -1,67$; $df = 14$; $p = 0,118$) zwischen der Manöverführung ($\mu = 3,34$; $\sigma = 2,43$) und der konventionellen Fahrt ($\mu = 5,00$; $\sigma = 2,90$). Die „Zeitliche Anforderung“ zeigt ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugführungskonzepten ($t = 0,49$; $df = 14$; $p = 0,632$). Die Mittelwerte liegen dicht beieinander (Manöver: $\mu = 6,30$; $\sigma = 3,35$; Konventionell: $\mu = 5,88$; $\sigma = 3,75$).

Die „Aufgabenerfüllung“ für die konventionelle Fahrzeugführung ($\mu = 9,85$; $\sigma = 3,08$) liegt oberhalb der Manöverführung ($\mu = 8,31$; $\sigma = 2,85$). Es ist aber kein Unterschied in der zentralen Tendenz ($WX=17$, $p=0,088$) nachweisbar.

Die aufgewendete „Anstrengung“ (Manöver: $\mu = 4,17$; $\sigma = 3,28$; Konventionell: $\mu = 4,60$; $\sigma = 3,33$) liegt für die konventionelle Fahrzeugführung etwas höher. Die Mittelwerte sind mit einem t-Test evaluiert worden, der keinen signifikanten Unterschied nachweisen konnte ($t = -0,42$; $df = 14$; $p = 0,678$).

Die „Frustration“ bei der Interaktion mit der manöverbasierten ($\mu = 4,79$; $\sigma = 4,25$) und der konventionellen Fahrzeugführung ($\mu = 2,77$; $\sigma = 3,22$) ist mit einem Wilcoxon-Test evaluiert worden und zeigt einen signifikanten Unterschied ($WX = 15$; $df = 14$; $p = 0,032$). Die „Frustration“ war bei den Novizen somit bei der manöverbasierten Fahrzeugführung größer als bei der konventionellen Fahrzeugführung.

Skalen des NASA TLX ZEIS	Manöverbasierte Fahrzeugführung		Konventionelle Fahrzeugführung	
	Lilliefors- Test	Shapiro- Wilk-Test	Lilliefors- Test	Shapiro- Wilk-Test
Geistige Anforderung	0,122	0,072	0,009	0,041
Körperliche Anforderung	0,274	0,180	0,307	0,234
Zeitliche Anforderung	0,499	0,342	0,316	0,412
Aufgabenerfüllung	0,500	0,824	0,238	0,012
Anstrengung	0,500	0,095	0,372	0,452
Frustration	0,068	0,014	0,004	0,001

Tabelle 15: Signifikanzwerte (p -Werte) des Tests auf Normalverteilung nach dem Lilliefors-Test und dem Shapiro-Wilk-Test für die Verteilung der Skalen des NASA TLX ZEIS in der Versuchsreihe der Novizen ($N = 15$)

Subjektivurteile zum manöverbasierten Fahrzeugführungskonzept In Abb. 65 ist die Häufigkeitsverteilung der Antworten der Novizen hinsichtlich der Frage nach einer Ent- oder Belastung durch die manöverbasierte Fahrzeugführung dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass der Modalwert bei einer Einstufung von 2 liegt, die Versuchspersonen also subjektiv den Eindruck hatten, dass sie durch die manöverbasierte Fahrzeugführung entlastet wurden. Insgesamt war aber ein Fünftel der Versuchspersonen (3 von 15) der Meinung, dass eine Belastung durch das manöverbasierte Fahrzeugführungssystem entsteht.

Die Frage wurde auf einer fünfstufigen Likertskala von „starke Entlastung“ bis „starke Belastung“ beantwortet (vgl. Abb. 65). Die Ergebnisse werden mit einem Einstichproben-test für das arithmetische Mittel bei unbekannter Varianz der Grundgesamtheit untersucht (vgl. Bleymüller *et al.*, 2002, S. 108), wobei die Standardabweichung über die Stichprobe geschätzt wird. Voraussetzung für die Durchführung des Tests ist eine Normalverteilung, die sowohl mit dem Lilliefors-Test ($KS = 0,21$; $p = 0,081$) als auch mit dem Shapiro-Wilk-Test ($SW = 0,92$; $p = 0,175$) nachgewiesen werden konnte.

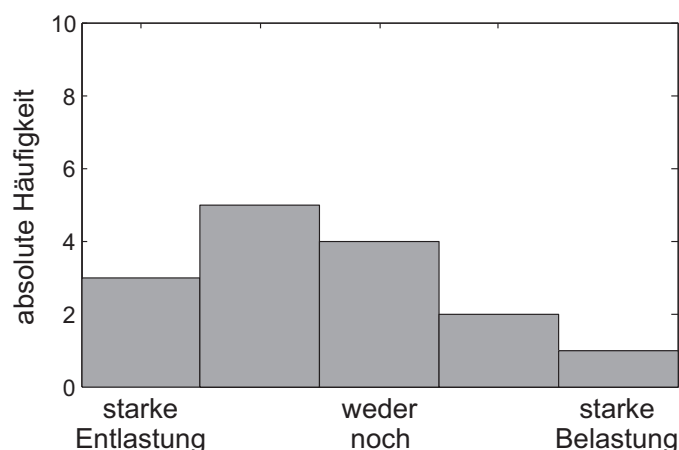


Abbildung 65: Histogramm zur Frage „Entlastet/Belastet Sie die manöverbasierte Fahrzeugführung im Vergleich zum normalen Fahren?“ auf einer fünfstufigen Likertskala von „starke Entlastung“ bis „starke Belastung“ ($N = 15$)

In diesem t-Test wird überprüft, ob sich der Stichprobenmittelwert signifikant von 3 (weder eine Belastung, noch eine Entlastung) unterscheidet. Der Mittelwert der Stichprobe liegt bei $\mu = 2,53$ ($\sigma = 1,19$) und keine signifikanten Unterschiede zur Skalenmitte ($t = -1,52$; $df = 14$; $p = 0,150$) konnten nachgewiesen werden. Eine subjektive Entlastung durch die manöverbasierte Fahrzeugführung findet bei den Novizen nicht statt.

In Abb. 66 ist die Bewertung der Manöverausführung durch die Novizen dargestellt. Das Manöver „Anfahren“, das im Normalfall nur zweimal während der Simulation vorkam, wurde mit einem Mittelwert von 1,43 ($\sigma = 0,65$) positiv beurteilt.

Die Ergebnisse für das Manöver „Straße folgen“ fallen ebenfalls positiv aus ($\mu = 1,53$; $\sigma = 0,99$), obwohl es das Manöver ist, das sowohl auf die Zeit als auch auf die Strecke gerechnet die längste Aktivierung besitzt.

Die Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“ ($\mu = 2,07$; $\sigma = 1,03$), „Fahrstreifenwechsel links“ ($\mu = 2,00$; $\sigma = 0,88$) und „rechts ranfahren“ ($\mu = 2,14$; $\sigma = 1,17$) liegen, was den Mittelwert als auch die Standardabweichung betrifft, auf einem sehr ähnlichen und mittelmäßigen bis guten Niveau.

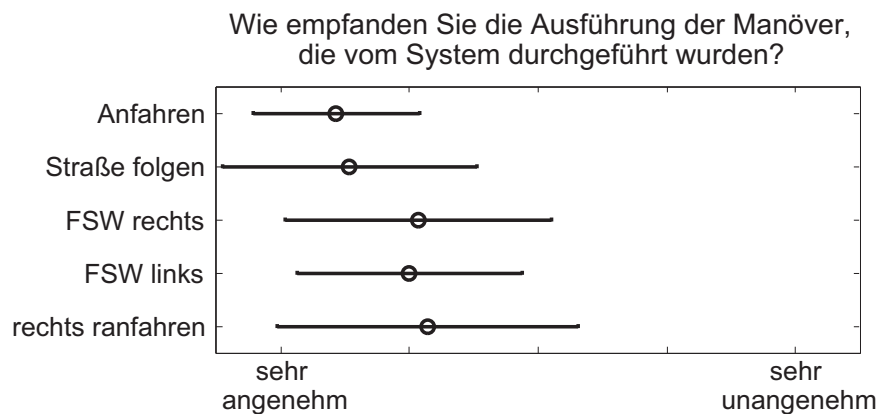


Abbildung 66: Subjektive Beurteilung der Manöverausführung ($N = 15$)

4.5.3 Überprüfung der Hypothesen

Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung In der Hypothese In01 wird die Häufigkeit der Durchführung des Manövers „Fahrstreifenwechsel“ überprüft. Es hat sich gezeigt, dass die Versuchspersonen höchst signifikant ($t = -5,81$; $df = 40$; $p < 0,001$) weniger Manöver während des Szenarios der manöverbasierten Fahrzeugführung (2 636 Fahrstreifenwechsel) durchgeführt haben als in der konventionellen Fahrt (3 068 Fahrstreifenwechsel). Hypothese In01 wird daher abgelehnt, denn die Manöverführung hat zu einer Reduzierung der Anzahl der Fahrstreifenwechsel geführt.

Hypothese In01: Die Anzahl an durchgeführten Fahrstreifenwechseln im Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung und der konventionellen Fahrzeugführung ist gleich.

abgelehnt

Sicherheit Eine zentrale Fragestellung, die sich bei der Evaluierung von Fahrerassistenzsystemen ergibt, ist die Häufigkeit von kritischen Situationen oder Unfällen. In Abb. 47 wurde gezeigt, dass die Anzahl der Unfälle bei einer Fahrbahnverringerng bei der Eingewöhnungsfahrt am höchsten und bei konventioneller Fahrzeugführung am niedrigsten war. Die manöverbasierte Fahrzeugführung liegt zwischen beiden. In Hypothese S01 wird die Anzahl der Unfälle, die in der Fahrt mit Manöverführung (Manöver) aufgetreten sind, mit der Anzahl in der konventionellen Fahrt verglichen. Dafür sind die Unfälle an allen Baustellen pro Fahrt addiert worden. Mit der Manöverführung wurde insgesamt 7-mal in die Baustellenabspernung gefahren, bei konventioneller Fahrzeugführung hingegen nur einmal.

Da die Ergebniss aufgrund der geringen Zahl an Merkmalsausprägungen nicht normalverteilt sein können (ein Lilliefors-Test weist diese mit $p < 0,001$ ebenfalls nach), wird ein verteilungsfreier Test verwendet. Da hier abhängige Stichproben vorliegen, wird der Wilcoxon-Test für den Vergleich von zwei abhängigen Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz verwendet.

Der Test zeigt kein signifikantes Ergebnis ($p=0,109$). Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich die Anzahl der Unfälle von ihrer zentralen Tendenz nicht unterscheidet.

Hypothese S01: Es besteht kein Unterschied in der Häufigkeit von Unfällen zwischen der manöverbasierten Fahrzeugführung und der konventionellen Fahrzeugführung in der Situation der Baustelleneinfahrt.

**kann nicht
abgelehnt
werden**

Hypothese S02 untersucht die Zeitlücken der Versuchspersonen in Strecke 2 und Strecke 3, die unter 0,5s liegen. Wie in Abb. 45 dargestellt und über einen t-Test nachgewiesen ($t = -4,68$; $df = 39$; $p < 0,001$), ist der Anteil der Zeitlücken unter 0,5s im konventionellen Fall höchst signifikant kleiner. Hypothese S02 wird daher abgelehnt, die manöverbasierte Fahrzeugführung führt zu einer Verringerung des Anteils an sehr kleinen Zeitlücken.

Hypothese S02: Die manöverbasierte Fahrzeugführung hat im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung keinen Einfluss auf die Zeitdauer, die Versuchspersonen unterhalb einer Zeitlücke von 0,5s fahren.

abgelehnt

Entlastung des Fahrers Unterschiede in der Beanspruchungssituation des Fahrers im Vergleich der konventionellen zur manöverbasierten Fahrzeugführung wird über die detaillierten Hypothesen E01–E07 ermittelt (vgl. Kap 4.3.2).

Um Hypothese E01 untersuchen zu können, wurden die Versuchspersonen in einem der Fragebögen gefragt, ob die manöverbasierte Fahrzeugführung zu einer Entlastung oder Belastung führt (vgl. Abb. 48). Die Frage wurde auf einer fünfstufigen Likertskala von „starke Entlastung“ bis „starke Belastung“ beantwortet (vgl. Abb. 48). Die Hypothese E01 wird mit einem Einstichprobentest für das arithmetische Mittel bei unbekannter Varianz der Grundgesamtheit untersucht (vgl. Bley Müller *et al.*, 2002, S. 108), wobei die Standardabweichung über die Stichprobe geschätzt wird.

Anhand von Hypothese E01 wird überprüft, ob sich der Stichprobenmittelwert signifikant von 3 (weder eine Belastung, noch eine Entlastung) unterscheidet. Der Mittelwert der Stichprobe liegt bei $\mu = 1,90$ und führt zu einem höchst signifikanten Unterschied ($t = -9,56$; $df = 40$; $p < 0,001$). Die subjektive Beurteilung der Versuchspersonen hinsichtlich der Entlastung durch das System ist gegeben.

Hypothese E01: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der subjektiv bewerteten Belastung. **abgelehnt**

Die Auswertung für die Hypothesen E2–E5 bezieht sich auf den NASA-TLX ZEIS und erfolgt über den Vergleich zweier Stichprobenmittelwerte aus verbundenen Stichproben (t-Test). Die Voraussetzung, dass sich die Differenzen der Stichprobe angenähert normalverteilen, muss für E02–E05 nicht überprüft werden, da die Stichprobengröße mit $N = 41$ größer als 30 ist und somit nach dem zentralen Grenzwerttheorem eine Normalverteilung angenommen werden kann.

Hinsichtlich der „Geistigen Anforderung“ (Abb. 54 oben links) wurde gezeigt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der konventionellen und der manöverbasierten Fahrt vorliegt ($t = -1,69$; $df = 40$; $p = 0,099$). Hypothese E2 kann daher nicht abgelehnt werden.

Hypothese E02: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der subjektiv empfundenen „Geistigen Anforderung“. **kann nicht abgelehnt werden**

Der Vergleich der Subskala „Körperliche Anforderung“ des NASA-TLX ZEIS zeigt, dass ein höchst signifikanter Unterschied zwischen der Manöverführung und der konventionellen Fahrzeugführung vorliegt ($t = -4,23$; $df = 40$; $p < 0,001$). Hypothese E03 wird daher abgelehnt, denn die „Körperlichen Anforderungen“ sind bei der konventionellen Fahrt größer.

Hypothese E03: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der subjektiv empfundenen „Körperlichen Anforderung“. **abgelehnt**

In Hypothese E04 wird die vom Fahrer wahrgenommene „Anstrengung“ untersucht, die ebenfalls keinen signifikanten Unterschied ($t = -1,98$; $df = 40$; $p = 0,054$) zwischen der konventionellen und der manöverbasierten Fahrzeugführung ausweist.

Hypothese E04: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der „Anstrengung“. **kann nicht abgelehnt werden**

Die Auswertung von Hypothese E05 zeigt, dass sich die vom Fahrer erlebte „Frustration“ zwischen der konventionellen Fahrzeugführung und der manöverbasierten Fahrt nicht unterscheidet ($t = -0,79$; $df = 39$; $p = 0,437$).

Hypothese E05: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der „Frustration“ der Fahrer. **kann nicht abgelehnt werden**

Die Hypothesen E06 und E07 werten das Blickverhalten der Versuchspersonen hinsichtlich der Blickzuwendungshäufigkeit und Blickzuwendungsdauer zu den Fahrstreifenmarkierungen aus. Wie in Abb. 36 dargestellt, haben die Versuchspersonen bei konventioneller Fahrzeugführung durchschnittlich 21,31 % ($\sigma = 13,54$ %) der Zeit auf die Fahrbahnmarkierungen geschaut. Bei der manöverbasierten Fahrt hat sich dieser Anteil auf 14,29 %

($\sigma = 12,61\%$) reduziert. Ein t-Test auf Mittelwertvergleich zeigt einen hoch signifikanten Unterschied ($t = -3,05$; $df = 33$; $p = 0,005$). Hypothese E06 wird abgelehnt, die Versuchspersonen wenden bei manöverbasierter Fahrzeugführung weniger häufig ihren Blick auf die Fahrbahnmarkierungen.

Hypothese E06: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der Blickzuwendungsdauer zu den Fahrstreifenmarkierungen (Einfluss auf die Stabilisierungsaufgaben).

abgelehnt

Ein ähnliches Ergebnis liegt für die Blickzuwendungshäufigkeit vor. Die durchschnittliche Fixationshäufigkeit (vgl. Abb. 37) lag bei konventioneller Fahrzeugführung bei 12,77% ($\sigma = 7,80\%$) und bei manöverbasierter Fahrzeugführung bei 8,48% ($\sigma = 7,16\%$). Ein t-Test zeigt hier ebenfalls einen hoch signifikanten Unterschied ($t = -3,21$; $df = 33$; $p = 0,003$). Auch hier wird die Hypothese (E07) abgelehnt. Die Versuchspersonen schauen weniger häufig auf die Fahrbahnmarkierungen.

Hypothese E07: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der Blickzuwendungshäufigkeit zu den Fahrstreifenmarkierungen (FSM) (Einfluss auf die Stabilisierungsaufgaben).

abgelehnt

Situation Awareness Die *Situation Awareness* wird über die Hypothesen SA01 und SA02 evaluiert, die sich auf das Blickverhalten der Versuchspersonen beziehen. Es wird angenommen, dass ein Fahrer eine unveränderte *Situation Awareness Level 1* hat, wenn er die gleiche Blickzuwendungshäufigkeit zu bestimmten für die Fahraufgabe wichtigen, AOI besitzt. Im Fall der Evaluierung der manöverbasierten Fahrzeugführung bedeutet dies eine nicht signifikant unterschiedliche Blickzuwendungshäufigkeit zum „Rückspiegel“ und zur „Straße“ in der konventionellen und der manöverbasierten Fahrt. Hypothese SA01 zeigt, dass kein signifikanter Unterschied ($t = -0,22$; $df = 33$; $p = 0,827$) zwischen der Blickzuwendungshäufigkeit bei konventioneller ($\mu = 18,26\%$; $\sigma = 4,44\%$) und manöverbasierter Fahrzeugführung ($\mu = 18,04\%$; $\sigma = 4,83\%$) vorliegt, und kann daher nicht abgelehnt werden.

Hypothese SA01: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Veränderung der Blickzuwendungshäufigkeiten zum Rückspiegel.

**kann nicht
abgelehnt
werden**

Die Auswertung von Hypothese SA02 zeigt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede ($t = 1,22$; $df = 33$; $p = 0,230$) für die konventionelle ($\mu = 65,26\%$; $\sigma = 12,96\%$) und die manöverbasierte Fahrt ($\mu = 68,32\%$; $\sigma = 12,02\%$). Auch hier kann die Hypothese nicht abgelehnt werden.

Hypothese SA02: Die manöverbasierte Fahrzeugführung führt im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung zu keiner Reduktion der Blickzuwendungsdauer auf die Straße (inkl. der sich darauf befindlichen Elemente)

**kann nicht
abgelehnt
werden**

Mode Awareness Ausgehend von der *2-Second-Rule* (vgl. z. B. Shinar, 2007) wird für die Evaluation der *Mode Awareness* untersucht, wie lange die Versuchspersonen benötigen, um eine Rückübernahme durchzuführen. Anhand eines in diesem Falle einseitigen t-Tests wird untersucht, ob die Versuchspersonen im Durchschnitt länger als 2 s für die Rückübernahme benötigt haben. Der Systemausfall war lediglich durch ein Warnsymbol auf dem Touchscreen und das Verschwinden des statischen Head-Up-Displays angezeigt. Es wurde kein akustischer Warnton gegeben.

Im Mittel benötigen die Versuchspersonen $\mu = 2,32 \text{ s}$ ($\sigma = 1,13 \text{ s}$) für die Rückübernahme. Der Test zeigt, dass die Reaktionszeit signifikant größer als 2 s ist ($t = 1,84$; $df = 40$; $p = 0,037$).

Hypothese MA01: Die Zeitdauer der Rückübernahme des Systems in einer kritischen Situation ist kleiner 2 s.

abgelehnt

Die Fahrer brauchen durchschnittlich länger als 2 s für eine Rückübernahme. Der Wert könnte durch einen Lerneffekt noch verbessert werden. In der Eingewöhnungsfahrt ($\mu = 4,52 \text{ s}$; $\sigma = 1,13 \text{ s}$) benötigten die Versuchspersonen bei einer ähnlichen Situation hoch signifikant länger ($t = 3,08$; $df = 40$; $p = 0,004$) für die Rückübernahme, was auf einen Lerneffekt schließen lässt.

Gebrauchstauglichkeit Wie in Abb. 42 dargestellt und im Abschnitt „Gebrauchstauglichkeit“ des Kapitels 4.5.1 statistisch nachgewiesen, gibt es keinen Unterschied in der Gebrauchstauglichkeit (gemessen anhand der *System Usability Scale*) zwischen der konventionellen und der manöverbasierten Fahrzeugführung ($t = 1,72$; $df = 39$; $p = 0,094$). Die Hypothese GT01 kann daher nicht abgelehnt werden.

Hypothese GT01: Die subjektiv empfundene Gebrauchstauglichkeit des manöverbasierten Fahrzeugführungskonzeptes unterscheidet sich nicht von der Gebrauchstauglichkeit der konventionellen Fahrzeugführung.

**kann nicht
abgelehnt
werden**

Risikohomöostase In Kapitel 4.5.1 wurde das Geschwindigkeitsverhalten in Nebelsituationen untersucht. Visualisiert durch Abb. 44 und nachgewiesen durch einen t-Test, wurde gezeigt, dass sich die Egofahrzeuggeschwindigkeit im Nebel nicht signifikant unterscheidet ($t = 0,43$; $df = 40$; $p = 0,667$). Ergänzend sei erwähnt, dass die Versuchspersonen eine deutliche Reduzierung ihrer Geschwindigkeit vorgenommen haben (vgl. Kapitel 4.5.1, Abb. 44). Hypothese RH01 kann daher nicht abgelehnt werden.

Hypothese RH01: Bei der manöverbasierten Fahrzeugführung wird in Nebelsituationen die gleiche Fahrgeschwindigkeit gewählt, wie bei konventioneller Fahrzeugführung.

**kann nicht
abgelehnt
werden**

Ein weiterer Aspekt der Risikohomöostase wird über die Zeitlücke, die von den Fahrern gewählt wird, evaluiert. Dafür sind alle Zeitlücken, die unterhalb von 5 s liegen und ab einer Geschwindigkeit von über $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ aufgetreten sind, ermittelt worden. Die durchschnittliche Zeitlücke bei manöverbasierter Fahrzeugführung beträgt unter den eben genannten Randbedingungen $\mu = 3,00 \text{ s}$ ($\sigma = 0,321 \text{ s}$) im konventionellen Fall $\mu = 2,91 \text{ s}$ ($\sigma = 0,26 \text{ s}$). Der t-Test zeigt, dass kein signifikanter Unterschied vorliegt ($t = 1,71$;

$df = 40$; $p = 0,094$). Die durchschnittlichen Zeitlücken sind demnach gleich und Hypothese RH02 kann nicht abgelehnt werden.

Hypothese RH02: Der Fahrer wählt sowohl bei der manöverbasierten Fahrzeugführung als auch bei der konventionellen Fahrzeugführung die gleiche Zeitlücke (bei einer Geschwindigkeit über $50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ und einer Zeitlücke von $<5 \text{ s}$)

**kann nicht
abgelehnt
werden**

Lerneffekte und Bahnführung auf fertigkeitbasierter Ebene Die Hypothese LE01 wird über eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung überprüft (vgl. Bortz, 2005 S. 331). Der Test zeigt, dass ein hoch signifikanter Unterschied zwischen den vier untersuchten Streckenabschnitten (0–15 km, 16–30 km, 31–45 km, 46–60 km) besteht ($F = 4,62$; $p = 0,005$).

Hypothese LE01: Die Blickzuwendungsdauer zum Touchscreen ändert sich über die zurückgelegten Streckenelemente 0–15 km, 16–30 km, 31–45 km, 46–60 km nicht.

abgelehnt

Die Varianzanalyse deckt nicht auf, welche Gruppen sich unterscheiden. Daher sind Einzelvergleiche mit t-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt worden (vgl. Bortz (2005)), die zeigen, dass sich der erste Streckenabschnitt signifikant von den restlichen unterscheidet (vgl. Tab. 16).

	0–15 km	16–30 km	31–45 km	46–60 km
0–15 km	—	$p = 0,0015$	$p < 0,001$	$p = 0,006$
16–30 km	$p = 0,0015$	—	$p = 0,968$	$p = 0,778$
31–45 km	$p < 0,001$	$p = 0,968$	—	$p = 0,777$
46–60 km	$p = 0,006$	$p = 0,778$	$p = 0,777$	—

Tabelle 16: p -Werte für die unterschiedlichen Blickzuwendungsdauern zum Touchscreen in vier Streckenabschnitten bei manöverbasierter Fahrzeugführung

Der Lerneffekt im Umgang mit dem System wird über Hypothese LE02 ermittelt. Bei den Verteilungen ist offensichtlich davon auszugehen, dass aufgrund der kleinen Werte keine Normalverteilung vorliegen kann, was ein Lilliefors-Test ($p < 0,001$) ebenfalls nachweist. Die Hypothese wird daher mit einem Wilcoxon-Test ausgewertet, der zeigt, dass zwischen der Anzahl der Unfälle bei der Baustelleneinfahrt (die Versuchspersonen mussten einen Fahrstreifenwechsel durchführen, um eine Kollision mit Baustellenelementen zu verhindern) in der Eingewöhnungsfahrt und dem Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung ein hoch signifikanter Unterschied besteht ($WX = 67$; $p = 0,0098$). Hypothese LE02 wird daher abgelehnt, da ein Lerneffekt durch die signifikante Reduzierung der Unfälle in der Baustelleneinfahrt nachweisbar ist.

Hypothese LE02: Die Anzahl der Unfälle in der Einfahrt zur Baustelle unterscheidet sich nicht zwischen der Eingewöhnungsfahrt (mit der manöverbasierten Fahrzeugführung) und dem Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung

abgelehnt

Unterschiede in der Fahrzeugführung bei erfahrenen Fahrern und Novizen Die erfahrenen Fahrer beauftragen durchschnittlich 66,83 Manöver und 29,88 Parameter im Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung. Die Novizen haben durchschnittlich 49,07 Manöver und 27,07 Parameter beauftragt. Zur Überprüfung der Hypothesen NZ01 und NZ02 muss für die Stichproben, die unterhalb von 30 Versuchspersonen liegen, ein Nachweis der Normalverteilung erfolgen. In diesem Fall sind dies die Manöver- und Parameterhäufigkeiten der Novizen ($N = 15$). Sowohl der Lilliefors-Test (Manöver: $KS = 0,14$; $p = 0,5000$; Parameter: $KS = 0,15$, $p = 0,5000$) als auch der Shapiro-Wilk-Test (Manöver: $SW = 0,96$; $p = 0,645$; Parameter: $SW = 0,97$; $p = 0,914$) weisen eine Normalverteilung nach. Zusätzlich wird anhand eines F-Tests die Varianzhomogenität der Manöverhäufigkeit von erfahrenen Fahrern und Novizen sowie die Varianzhomogenität der Parameterhäufigkeit von erfahrenen Fahrern und Novizen überprüft. Sowohl für die Manöver ($F = 0,94$; $df1 = 14$; $df2 = 40$; $p = 0,943$) als auch für die Parameter ($F = 0,94$; $df1 = 14$; $df2 = 40$; $p = 0,938$) liegt Varianzhomogenität vor. Die Untersuchung der Unterschiede der Parameter- und Manöverhäufigkeiten mit einem t-Test für unabhängige Stichproben ist demnach zulässig. Die Analyse zeigt, dass sich die Anzahl der Manöveraufträge hoch signifikant unterscheidet ($t = -2,77$; $df = 54$; $p = 0,008$). Die erfahrenen Fahrer beauftragen hoch signifikant mehr Manöver. Hypothese NZ01 wird abgelehnt.

Hypothese NZ01: Die Anzahl an beauftragten Manövern pro Versuchsperson der Gruppe der erfahrenen Fahrer ist gleich der Anzahl an beauftragten Manövern pro Versuchsperson der Novizen.

abgelehnt

Bei den Parametern lässt sich dies nicht nachweisen. Die Häufigkeit unterscheidet sich nicht signifikant ($t = -0,71$; $df = 54$; $p = 0,478$). Hypothese NZ02 kann nicht abgelehnt werden.

Hypothese NZ02: Die Anzahl an Parameteränderungen pro Versuchsperson der Gruppe der erfahrenen Fahrer ist gleich der Anzahl der Parameteränderungen pro Versuchsperson der Novizen.

**kann nicht
abgelehnt
werden**

4.6 Diskussion

Obwohl viele Manöver und Parameteränderungen von den Versuchspersonen während der Fahrt mit der manöverbasierten Fahrzeugführung beauftragt worden sind, konnte das Niveau der Fahrmanöverausführung der konventionellen Fahrt nicht erreicht werden (vgl. Hypothese In01). Dennoch ist zu erwarten, dass mit der hohen Anzahl der beauftragten Manöver bei der manöverbasierten Fahrzeugführung der Fahrer zumindest in gewissen Teilen im Regelkreis der Fahrzeugführung gehalten werden konnte. Positiv zu beurteilen ist, dass die Manöver- und Parameteraufträge homogen über die Versuchspersonen und die Versuchsstrecke verteilt sind, also kaum zeitliche Abschnitte aufgetreten sind, in denen wenig oder nicht interagiert wurde, was einen zeitlich begrenzten, aber unerwünschten Rückzug aus der Fahraufgabe zeigen würde. Außerdem konnte gezeigt werden, dass

die Wahl, welcher Fahrstreifen befahren wird, nicht durch die Manöverführung beeinflusst wird. Dies zeigt, dass sich das Bahnführungsverhalten der Versuchspersonen hinsichtlich der Querposition nicht geändert hat.

Die Vermutung, dass der Fahrer zumindest für einen gewissen Anteil im Regelkreis gehalten wird, ist auch durch die Analyse der Blickbewegungsdaten bestärkt worden. Eine Reduzierung der Blickzuwendungshäufigkeit und -dauer auf die für die Bahnführung und die sichere Fahrzeugführung wichtigen AOI, wie der „Straße“ (inkl. der anderen Verkehrsteilnehmer) und dem „Rückspiegel“, war nicht nachweisbar (vgl. Hypothese SA01 und SA02). Diese Werte spiegeln allerdings nur die *Situation Awareness Level 1* wider (vgl. Endsley & Kiris, 1995, S.36, „Perception of the Elements in the Environment“). Level 2 (vgl. Endsley & Kiris, 1995, S.37 „Comprehension of the Current Situation“) und Level 3 (vgl. Endsley & Kiris, 1995, S.37 „Projection of Future Status“) der *Situation Awareness* wurden nicht erfasst, da die dafür übliche Methode (SAGAT nach Endsley, 1988), die ein Pausieren des Simulationslaufes benötigt, im Fahrsimulator nicht implementierbar war.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass in Sondersituationen mit kritischen Elementen, wie der unerwarteten Baustelleneinfahrt, sich der Anteil an Unfällen nicht signifikant zwischen den beiden Szenarios unterscheidet (vgl. Hypothese S01). Auch dies deutet darauf hin, dass der Fahrer weiterhin seine Fahrzeugführungsaufgabe wahrnehmen konnte. Dieses Ergebnis sollte jedoch in zukünftige Studien mit anderen kritischen Fahrsituationen näher untersucht werden.

Ein weiterer Sicherheitsgewinn kommt durch die geringere Zeitdauer, die der Fahrer unterhalb einer Zeitlücke von 0,5 s fährt, zustande (vgl. Hypothese S02). Dies ist zwar durch das technische System erzwungen, führt somit aber zwangsläufig zu einem größeren Zeitbereich, in dem der Fahrer bei Änderung von Längsführungsgrößen reagieren kann. Ähnliche Effekte sind bei der Nutzung von ACC, insbesondere bei Folgefahrten, beobachtet worden. Filzek (2002) weist nach, dass Fahrer im konventionellen Fahrbetrieb in 41 % der Zeit den für Bußgelder zugrunde gelegten Mindestabstand von 0,9 s unterschreiten. Für die ACC-Fahrten lag dieser Anteilswert deutlich darunter.

Im Fall einer Rückübernahme (evaluiert anhand einer Situation, in der das System ausgefallen ist und dies nur visuell durch ein Symbol auf dem Display und dem Wegfall des Manöversymbols im Head-Up-Display angezeigt wurde) ist die Zeit zwischen Systemausfall und Eingriff durch den Fahrer signifikant länger als 2 s (vgl. Hypothese MA01), was für ein Fehlen von *Mode Awareness* spricht und den sonst guten Eindruck des Umgangs mit der manöverbasierten Fahrzeugführung durch die Versuchspersonen mindert. Eine Ursache könnte in der Art der Anzeige des Systemausfalls begründet liegen. Wären zusätzlich akustische Anzeigen implementiert worden, hätte wahrscheinlich die Übernahmezeit weiter reduziert werden können.

In weiteren Untersuchungen wird man nachweisen müssen, ob sich der Effekt einer homogenen Verteilung und häufigen Beauftragung von Fahrmanövern in Langzeitversuchen nachweisen lässt. Durch die Versuchsbedingungen im Fahrsimulator können die Versuchspersonen über das in der Realität zu erwartende Maß hinaus animiert gewesen sein, mit dem System zu interagieren. Langfristig wird man, sofern der Fahrer zu jeder Zeit in der Fahraufgabe gehalten werden muss, Fahrerzustandserfassungssysteme implementieren müssen. Diese Systeme fordern den Fahrer bei der Detektion eines Rückzuges aus der Fahraufgabe zu einer Rückübernahme auf. Diese erzwungenen *Transitionen* werden schon heute bei Spurhalteassistenten verwendet, wenn der Fahrer, während das System aktiviert ist, die Hände vom Lenkrad entfernt (Gayko, 2005).

Der Sicherheitsgewinn durch eine Verringerung der Zeitlücken unterhalb von 0,5 s ist dem technischen System zuzuordnen, da dieses im stationären Betrieb (Folgefahrt) keine Zeitlücken unter 1 Sekunde zulässt. Durch die Einführung eines Assistenzsystems kann aber unbeabsichtigt auch eine Erhöhung des Risikos stattfinden, so dass ein Sicherheitsgewinn durch ein technisches System von einem risikoreicheren Fahrerverhalten kompensiert wird, wie Aschenbrenner & Biehl (1994) für das ABS zeigen konnten. Dieser Effekt lässt sich für die manöverbasierte Fahrzeugführung nicht nachweisen, wenn man die Ergebnisse der Nebelsituation auf die Gesamtinteraktion überträgt (vgl. Hypothese RH01). Die Ursache kann darin begründet sein, dass die Versuchspersonen keinen Sicherheitsgewinn durch die manöverbasierte Fahrzeugführung empfinden. Dem steht jedoch die subjektive Einschätzung der Versuchspersonen zur Fahrsicherheit der Manöverführung entgegen, die eine signifikante Erhöhung (vgl. Abb. 59) zeigt. Eine andere Ursache kann in der kurzen Nutzungsdauer begründet sein. Erlangen Nutzer detailliertes Wissen zu Systemgrenzen, und wird ihnen dadurch bewusst, dass ein System beispielsweise trotz Nebel andere Fahrzeuge erkennen kann, ist es möglich, dass sich eine Erhöhung der Geschwindigkeit im Nebel im Vergleich zur konventionellen Fahrzeugführung erst nach einer gewissen Nutzungsdauer ergibt. Diese Hypothese kann mit den vorliegenden Daten nicht beantwortet werden.

Ein Ziel, das bei der Entwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung verfolgt wurde, ist eine Reduzierung der Beanspruchung des Fahrers. Auf der subjektiven Seite konnte dies gezeigt werden (vgl. Hypothese E01). Hypothese E01 bezieht sich allerdings auf die grob formulierte Frage der Belastung, die direkt an die Versuchspersonen über einen Fragebogen gerichtet wurde. Detailliertere Aussagen lassen sich aus den Ergebnissen des NASA-TLX ZEIS ableiten. Auch dort kann für bestimmte Skalen gezeigt werden, dass eine Entlastung des Fahrers vorliegt. So liegt ein höchst signifikanter Unterschied hinsichtlich der „Körperlichen Anforderungen“, die physische Belastungen widerspiegeln, vor (vgl. Hypothese E03). Ein Risiko, dass bei der Entwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung auftreten kann, ist, die „Geistigen Anforderungen“ durch höhere kognitive Anteile in der Bahnführungsaufgabe (der Fahrer muss überlegen, welches Manöver er auf der Manöverschnittstelle auswählt) zu erschweren, wie dies im Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung über den verschiebbaren Pfeil hinter der „Auswahl eines expliziten Manövers“ dargestellt ist. Die Ergebnisse zeigen, dass in Bezug auf die „Geistigen Anforderungen“ zumindest keine Erhöhung entstanden ist. Es konnte aber auch keine Reduktion dieser Skala erreicht werden, da kein statistisch signifikanter Unterschied gefunden wurde (vgl. Hypothese E02). Der p -Wert liegt allerdings zwischen 0,05 und 0,10, so dass zumindest ein Trend in Richtung einer mentalen Entlastung gezeigt werden kann, der durch eine Veränderung des Funktionsumfangs oder der Interaktion unter Umständen weiter verbessert werden könnte. Zwei weitere Skalen des NASA TLX ZEIS, die in die Diskussion miteinfließen sollen, wurden für die Hypothesen E04 und E05 verwendet.

Die von den Versuchspersonen empfundene „Anstrengung“ (vgl. Hypothese E04) zeigt keine Unterscheidung zwischen der Manöverführung und der konventionellen Fahrzeugführung, der p -Wert zeigt mit einem Wert von 0,054 aber einen Trend zur Reduzierung der „Anstrengung“, besonders wenn man bedenkt, dass in den Versuchen nur wenig Verkehr enthalten war und somit generell nur ein moderates Anstrengungsniveau vorlag. Würde man das Konzept in einem Szenario, in dem mehr Verkehr mit ungleichmäßigem Längsgeschwindigkeitsverhalten auftritt, testen, ist eine signifikante Reduzierung der „Anstrengung“ möglich. Dies kann ein Anknüpfungspunkt für weitere Evaluationen von bestehenden und zukünftigen Prototypen sein.

Hypothese E05 zeigt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der „Frustration“ bei konventioneller und manöverbasierter Fahrt zu finden ist. Beide Mittelwerte liegen auf einem niedrigen Niveau, es gibt aber bei beiden Konzepten Ausreißer in Richtung einer hohen Frustration. Dies ist ein wichtiger Faktor für die Entwicklung eines neuen Systems. Wenn die Nutzer Frustration bei der Bedienung des Systems erleben, wird eine Entlastung oder gar die Akzeptanz solcher Systeme nicht positiv ausfallen. Das gleiche Niveau der „Frustration“ kann in den gezeigten Versuchen aber auch durch die nicht immer erwartungskonforme Bedienung eines Fahrsimulators entstehen. Dies wurde durch eine 30-minütige Eingewöhnungsfahrt versucht zu verhindern, kann aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Neben den subjektiven Daten aus Fragebögen wurde mit den Blickbewegungsdaten hinsichtlich der Blickzuwendungsdauer und der Blickzuwendungshäufigkeit zu den Fahrstreifenmarkierungen gezeigt, dass die manöverbasierte Fahrzeugführung zu einer zumindest visuellen Entlastung des Fahrers auf *Stabilisierungsebene* führt. Da die Blickzuwendungsdauer zur Straße unverändert geblieben ist, kann davon ausgegangen werden, dass Informationen, die für die Bahnführungsaufgabe relevant sind, weiterhin wahrgenommen werden.

Eine ähnliche Argumentation lässt sich für die Längsgeschwindigkeitsregelung zeigen. Die relative Blickzuwendungsdauer zum Tachometer reduziert sich höchst signifikant von 5,8 % auf 3,3 %. Bei der Betrachtung der relativen Blickzuwendungshäufigkeit ist der Unterschied noch deutlicher. Hier ist eine höchst signifikante Reduzierung von ca. 18,3 % bei konventioneller Fahrzeugführung auf 8,5 % bei manöverbasierter Fahrzeugführung erreicht worden. Auch dies zeigt, dass eine zumindest visuelle Entlastung des Fahrers auf *Stabilisierungsebene* (Längsstabilisierung) stattgefunden hat (weniger Kontrollblicke zum Tachometer, die Längsregelung vom Fahrzeug übernommen wird).

Die Blickbewegungsanalyse hat auch gezeigt, dass die Versuchspersonen etwa 4 % der Zeit auf den Touchscreen der Manöverschnittstelle geschaut haben. Dieser Wert für sich allein betrachtet bedeutet eine erhöhte Blickabwendung vom Straßenverkehr. Allerdings reduziert die manöverbasierte Fahrzeugführung, wie oben erwähnt, die Blickzuwendungshäufigkeiten und -dauern zu den für die Stabilisierung des Fahrzeugs wichtigen AOI. Zieht man diese Einsparungen von der Erhöhung durch die Blicke zum Touchscreen ab, zeigt sich sogar eine positive Differenz. Es bleibt dem Fahrer mehr Zeit, sich auf das Fahrgeschehen zu fokussieren.

Dieses Ergebnis muss allerdings in weiteren, möglichst im Feld durchgeführten Versuchen verifiziert werden. Da bei dem verwendeten Fahrsimulator kaum Nebenaufgaben zur Befriedigung der Komfort-, Informations-, und Entertainmentbedürfnisse durchgeführt werden konnten (es existiert im Fahrsimulator kein Radio oder dergleichen), ist es möglich, dass die Fahrer den Zeitgewinn durch die Reduzierung der für die Stabilisierung wichtigen AOI zur Bedienung des Infotainmentsystems nutzen würden.

Überraschend sind die Ergebnisse zum Head-Up-Display. Der Anteil der relativen Blickzuwendungshäufigkeit (4,6 %) und -dauer (1,5 %) ist sehr niedrig und liegt noch unterhalb der Werte des Touchscreens. Es lassen sich zwei Erklärungsansätze finden. Zum einen könnte das Head-Up-Display für die Erfüllung der Fahraufgabe mit der manöverbasierten Fahrzeugführung nicht hilfreich gewesen sein. Zum anderen könnte die räumliche Anordnung der Icons im Head-Up-Display für die geringe Blickzuwendungshäufigkeit verantwortlich sein, da die Manövericons nebeneinander dargestellt sind und in Abhängigkeit der Verkehrssituation ein- und ausgeblendet werden. Dies könnte dazu führen, dass mit wenig Übung die Erkennung, welches Manöver ausgeführt wird, peripher wahrnehmbar

ist. Die Blickbewegungsanalyse in der Form, wie sie in dieser Arbeit aufgenommen und ausgewertet wurde, kann jedoch nur die tatsächlichen Fixationen aufzeichnen.

Die Gebrauchstauglichkeit wurde subjektiv über die *System Usability Scale* nach Brooke (1996) ermittelt. Der Fragebogen wurde nach der manöverbasierten und nach der konventionellen Fahrt ausgefüllt. Es zeigt sich, dass kein Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugführungskonzepten vorliegt (Hypothese GT01). Da beide Beurteilungen auf einem ähnlich hohen Niveau sind, kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass die konventionelle Fahrt durch die nicht immer realitätsgetreue Simulation schlechter beurteilt wurde. Vergleicht man die Mittelwerte der *System Usability Scale* aus der Evaluation der manöverbasierten Fahrzeugführung (Manöver: $\mu = 75,43$; Konventionell: $\mu = 70,13$) mit dem Mittelwert von 206 Studien ($\mu_{206\text{Studien}} = 69,69$), in denen die *System Usability Scale* eingesetzt wurde nach Bangor *et al.* (2008), zeigt sich, dass die erzielten Ergebnisse dieser Studie, trotz des prototypischen Zustandes, auf gleichem oder höherem Niveau liegen.

Ein Teilaspekt der Gebrauchstauglichkeit ist nach DIN EN ISO 9241 – Teil 11 (1999) die Effizienz, die in dieser Studie anhand der durchschnittlich benötigten Zeit zur Zielerfüllung, in diesem Fall zur Absolvierung der Fahrmission, benötigt wird. Bei der Geschwindigkeit zeigt sich, dass die Versuchspersonen mit der manöverbasierten Fahrzeugführung höchst signifikant langsamer fahren als mit konventioneller Fahrzeugführung und dass die Effektivität demnach gesunken ist. Hier muss allerdings in die Betrachtung miteingeschlossen werden, dass die Versuchspersonen mit aktiviertem System nicht schneller als die zulässige Höchstgeschwindigkeit fahren durften. Bei konventioneller Fahrzeugführung war dies nicht der Fall.

Die Überprüfung von Lerneffekten benötigt in der Regel einen längeren Zeitraum. Takae *et al.* (2006) evaluiert neben der Akzeptanz auch das Systemverständnis, das als Indiz für Lerneffekte verwendet wird, eines ACC-Systems in Feldversuchen und überlässt den Versuchsträger für vier Wochen den Versuchspersonen. Von Sacher (2008) wird ein Zeitraum von sechs Wochen empfohlen, um Lerneffekte für Fahrerassistenzsysteme evaluieren zu können. Weinberger *et al.* (2001), der Versuche zu ACC mit Vielfahrern ($>1000 \frac{\text{km}}{\text{Woche}}$) gemacht hat, geht davon aus, dass frühestens nach zwei Wochen von einem stabilen Fahrerverhalten ausgegangen werden kann.

Es lassen sich jedoch kurzfristige Lerneffekte zeigen, wie die Ergebnisse zu Hypothese LE01 und LE02 zeigen. Die Ursache liegt in der Vorkenntnis der Versuchspersonen begründet. Je geringer die Vorkenntnisse der Lernenden sind, desto größer ist die relative Leistungsverbesserung (Schlick *et al.*, 2010). Dies konnte insbesondere bei der Hypothese LE02 gezeigt werden, die einen hoch signifikanten Unterschied in der Anzahl der Unfälle bei der Einfahrt in die Baustelle zwischen der Eingewöhnungsfahrt und dem Szenario der manöverbasierten Fahrzeugführung ausweist. Dies kann als Lerneffekt auf *Bahnführungsebene* angesehen werden, da sich der Fahrer darauf verlassen hat, dass das Fahrzeug die Sollgröße (Querpositionsänderung auf einen Nachbarfahrstreifen) selbständig ändert. Es wurde in den Versuchen anhand der Kollision mit den Markierkegeln gelernt, dass in dieser Situation der Fahrer ein Manöver beauftragen muss (nach Rasmussen, 1983 könnte man auch von einem Lerneffekt auf regelbasierter Stufe sprechen). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass Systemgrenzen vor der ersten Interaktion mit der manöverbasierten Fahrzeugführung erlernt werden müssen. Die relativ große Anzahl an Unfällen lässt sich aber auch darauf zurückführen, dass im Fahrsimulator durch die fehlenden negativen Auswirkungen von Unfällen (keine Verletzungsgefahr, keine Kosten für Reparatur) die Versuchspersonen das System länger aktiviert gelassen haben.

Ein Lerneffekt, der in der relativ kurzen Interaktionszeit mit dem System nicht unbedingt zu erwarten war, ist die signifikante Reduzierung der Blickzuwendungszeit über den Streckenverlauf (Hypothese LE01) zum Touchscreen. Dies zeigt, dass auch bei längerer Nutzung des Systems eine weitere Reduzierung der Blickzuwendungsdauer zum Touchscreen zu erwarten ist. Auch zeigen die Ergebnisse hinsichtlich der Fragen zum Systemverständnis (vgl. Abb. 46), dass die Versuchspersonen nach den Versuchsfahrten die meisten Systemgrenzen und die Funktionsweise des Systems verstanden hatten.

Die Manöverausführung ist von den Versuchspersonen subjektiv bewertet worden. In den Abb. 49 bis 52 sind diese Ergebnisse dargestellt. Es zeigt sich sowohl bei der Manöverausführung als auch bei der Erwartungskonformität der Manöverausführung, dass das Regelverhalten der Manöver „Fahrstreifenwechsel rechts“, „Fahrstreifenwechsel links“ und „rechts ranfahren“ Optimierungspotenzial aufweist. Die Manöver sind nur im mittleren Bereich bewertet worden. Vergleicht man die Trajektorienverläufe der Fahrstreifenwechsel bei manöverbasierter Fahrzeugführung und konventioneller Fahrt (vgl. Abb. 43), fällt auf, dass die für den Fahrstreifenwechsel in Anspruch genommene Zeit bei Manöverführung kleiner ist. Dies resultiert in größeren Gierraten und Querschleunigungen, die trotz des statischen Fahrsimulatoraufbaus wahrgenommen wurden.

Die Erkennung, wann ein Manöver geendet hat, ist von den Versuchspersonen durchweg positiv beurteilt worden. Der Manöverbeginn ist für die vorwiegend querführungsorientierten Manöver etwas schlechter. Die Ursache liegt in einer fehlenden Rückmeldung des Systems über Manöver in „Warteschleife“, wie bei einem kurzfristig nicht durchführbaren, aber beauftragten Manöver (z. B. Fahrstreifenwechsel bei nicht freiem Zielfahrstreifen).

Eine weitere subjektive Beurteilung fand hinsichtlich der Wichtigkeit der Manöver und Parameter statt. Es zeigt sich, dass die Manöver und Parameter, die am häufigsten beauftragt wurden, als wichtigste eingestuft wurden. Eine Ausnahme bildet hier der „Wunschabstand“, der trotz der selteneren Beauftragung als wichtig eingestuft wurde. Das Ergebnis zeigt den Bedarf einer manöverbasierten Fahrzeugführung. Die Versuchspersonen hätten auch bis auf das Manöver „Straße folgen“ alle Manöver als überflüssig einstufen und somit zeigen können, dass eine kombinierte Längs-Querführung für ihre Bedürfnisse ausreicht (z. B. eine Kombination von LKAS und ACC oder ein Konvoiassistenzsystem). Das Fahrerverhalten der Novizen wurde in Kapitel 4.5.2 vorgestellt. Bei der Blickbewegung zeigen sich ähnliche Effekte wie bei den erfahrenen Fahrern. Es ist durch den Wegfall der Stabilisierungsaufgabe im manöverbasierten Fall eine Reduzierung der Blickzuwendungshäufigkeit zu den AOI „Tachometer“ und „Fahrstreifenmarkierungen“ gekommen. Die Möglichkeit der (visuellen) Entlastung des Fahrers besteht auch ohne Fahrerfahrung. Auch der Anteil, den die Fahrer auf die Straße geschaut haben, verändert sich durch die Manöverführung nicht.

Die Verteilung der Manöver und die Parameterinteraktion ist bei den Novizen ähnlich den Erfahrenen, liegt aber auf einem niedrigeren Niveau. Dieser Unterschied in der Interaktion zwischen erfahrenen Fahrern und Novizen ist über die Hypothesen NZ01 und NZ02 ausgewertet worden. Dabei zeigt sich, dass die erfahrenen Fahrer hoch signifikant mehr Manöver beauftragen als die Novizen. Die Fahrerfahrung scheint demnach einen Einfluss auf das Bahnführungsverhalten zu besitzen. Bei der Häufigkeit von Parameteraufträgen konnte kein Unterschied festgestellt werden.

Der Nachweis einer visuellen Entlastung von Stabilisierungsaufgaben kann, bezogen auf die „Körperliche Anforderung“ sowie die erlebte „Anstrengung“, erfasst über den NASA TLX ZEIS, nicht gezeigt werden. Interessant ist allerdings, dass eine Reduzierung der

„Geistigen Anforderung“ fast gelungen wäre ($p=0,050$). Dies spricht dafür, dass der Anteil an „Geistigen Anforderungen“ bei den Novizen beim konventionellen Führen eines Fahrzeugs (der ebenfalls größer ist als der der erfahrenen Fahrer) ein größeres Potential für eine Reduzierung bildet als bei den erfahrenen Fahrern. Dies kann auch mit dem Modell nach Rasmussen (1983) erklärt werden. Für erfahrene Fahrer sind viele Tätigkeiten der Fahraufgabe (nach Donges, 1982 auch der *Bahnführungsebene*) fertigkeitsbasiert und haben somit keinen oder nur sehr geringe kognitive Anteile. Bei den Novizen scheint dies noch nicht der Fall zu sein. Hier müssen Bahnführungsentscheidungen noch auf wissensbasierter Ebene erfolgen, was sich in einer größeren „Geistigen Anforderung“ widerspiegelt. Dies wird bestätigt durch die Ergebnisse hinsichtlich der Frage nach einer Be- oder Entlastung durch die manöverbasierte Fahrzeugführung (vgl. Abb. 65). Im Gegensatz zu den erfahrenen Fahrern konnte hier keine signifikante Reduzierung erreicht werden. Die Novizen sind ebenfalls über die Manöverausführung befragt worden und zeigten ähnliche Ergebnisse wie die Erfahrenen.

5 Fazit und Ausblick

Grundsätzlich sind zwei Migrationspfade für eine manöverbasierte Fahrzeugführung und *Conduct-by-Wire* möglich. Erstens kann man von der Annahme ausgehen, dass die Systeme, die gerade entwickelt werden, eine sehr hohe Güte erreichen und damit eine absolute Beherrschung aller (auf bestimmte Szenarios eingeschränkten) Situationen aufweisen. Dies würde ein autonomes Fahrzeug zumindest für bestimmte Fahrszenarios oder Fahrmissionsabschnitte (z. B. Autobahnabschnitte) bedeuten. Dann ist das in dieser Arbeit vorgestellte Fahrzeugführungskonzept eine Möglichkeit, die Nutzer, die sich nicht einfach „chauffieren“ lassen möchten, in die Fahraufgabe einzubinden. Dies könnte bei einer Ablehnung von autonomen Fahrzeugen die Akzeptanz bei den Nutzern erhöhen.

Zweitens kann, obwohl die Systeme immer besser und sicherer werden, nicht davon ausgegangen werden, dass alle Situationen beherrscht werden können. In diesem, für die nahe Zukunft wahrscheinlicheren Fall, muss der Fahrer als Überwacher so in die Fahrzeugführung eingebunden werden, dass die in dieser Arbeit beschriebenen Probleme berücksichtigt werden. Die wichtigste Aufgabe ist dabei, den Fahrer im Regelkreis der Fahrzeugführung zu halten, so dass er in jeder Situation eingreifen kann. Diese Arbeit konnte zeigen, dass das Konzept einer Manöversteuerung prinzipiell geeignet ist, um dies zu erreichen, es müssen allerdings, vor allem was die Manöverschnittstelle betrifft, noch einige Änderungen und Erweiterungen vorgenommen werden.

Die Akzeptanz muss in weitergehenden Untersuchungen ebenfalls detailliert erfasst werden. Es ist aber zu erwarten, dass zumindest bei Nutzern, die Autofahren als reinen Zweck ohne Fahrspaß sehen, eine Akzeptanz zu erreichen ist. Darüber hinaus konnte Schaller *et al.* (2008) eine gute Akzeptanz für einen Stauassistenten zeigen, der aus derzeitiger Sicht der Manöverführung am nächsten kommt.

Gestaltungsempfehlung für die Weiterentwicklung der manöverbasierten Fahrzeugführung

Wichtigste Erweiterung ist dabei eine Rückmeldung des aktuellen Automationszustandes über ein kontinuierliches Bedienelement an den Fahrer. Lenkrad und Pedale werden präferiert, da eine Umgewöhnung der Autofahrer an zusätzlich neue Bedienelemente auf *Stabilisierungsebene* zu einer Überforderung oder generellen Abneigung gegenüber dem System führen kann. Das Wissen, stets zu einer traditionellen Art der Fahrzeugführung zurückkehren zu können, wird potentielle Nutzer eher stimulieren, ein neues Interaktionskonzept auszuprobieren.

Auch wenn der Fahrer nur auf *Bahnführungsebene* Eingaben tätigt, sollte er auf *Stabilisierungsebene*, zum Beispiel über die Bewegung des Gaspedals oder des Lenkrads, eine Rückmeldung erhalten. Im Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung (vgl. Kapitel 3.1.3) würde man die während der Manöverinteraktion nicht vorhandene Rückführung über die Bedienelemente ergänzen. Dabei muss sichergestellt werden, dass der Fahrer seine Hände/Füße nicht von den Bedienelementen nehmen kann. Es ist hier bei einem weitgehend perfekten System zu erwarten, dass sich ein starkes Systemvertrauen aufbaut und der Fahrer sich somit mehr mit Nebenaufgaben beschäftigt. Dem könnte mit einer Hand-off-Detektion entgegengewirkt werden, die vom Fahrer verlangt, dass er immer seine Hände am Lenkrad haben muss und somit zwangsläufig eine Rückmeldung des Stabilisierungszustandes des Fahrzeugs zurückgemeldet bekommt.

Ein weiteres wirksames Mittel gegen den Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe könnte ein Blickerfassungssystem im Fahrzeug sein, das bei einer zu häufigen und zu langen Abwendung des Fahrerblickes von der Straße zu einer Rückübernahme auffordert. An-

sätze für eine technische Umsetzung solcher Systeme sind beispielsweise für die Fahrer-müdigkeitserkennung bereits vorhanden (Horng *et al.*, 2004; Friedrichs & Yang, 2010). Nur wenn der Fahrer einen noch zu definierenden Anteil der Zeit auf die für die Fahrzeugführung relevanten Interessensbereiche blickt, darf das System aktiv bleiben. Einen Richtwert für den Anteil, der beispielsweise auf die Straße geschaut werden muss, kann dieser Arbeit entnommen werden (vgl. Kapitel 4.5 und Abb. 36 und 37).

Eine Verbesserung für nachfolgende Versuche muss ebenfalls bei den Reglern für Längs- und Querdynamik im Fahrsimulator gemacht werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass besonders die Querführung bei Fahrstreifenwechseln („rechts ranfahren“ ist von der Ausführung sehr ähnlich und wird in die Betrachtung miteingeschlossen) nur mittelmäßig bewertet wurden. Die Querführung ist anhand einer Sigmoidfunktion realisiert worden. Durch Parameteränderungen der Sigmoidfunktion lässt sich eine Streckung der Kurve und somit der Sollwertvorgabe für den Querführungsregler erreichen. Ob diese ausreicht, muss in weiteren Versuchen evaluiert werden.

Ist allein durch diesen Wert keine Verbesserung zu erreichen, muss eine andere Sollwertvorgabe gefunden werden. Hier könnte, vorausgesetzt die Nutzer möchten in der gleichen Art und Weise von einem technischen System gefahren werden, wie sie selber fahren, eine Analyse von Fahrstreifenwechseln bei manueller Fahrt helfen (möglichst aus Realversuchen). Bevor eigene Versuche durchgeführt werden, sollte allerdings die vorhandene Literatur untersucht werden (eine ausführliche Behandlung des Fahrstreifenwechsels ist in Fastenmeier *et al.*, 2001 zu finden). Auch möglich ist die Auswertung von schon bestehenden Versuchsdaten hinsichtlich der Trajektorienverläufe bei Fahrstreifenwechseln. Eine andere Ursache der nur mittelmäßigen Bewertung könnte in einer fehlenden Parametrisierung von Fahrstreifenwechseln liegen. Ist über das oben genannte Vorgehen keine Verbesserung eingetreten, kann davon ausgegangen werden, dass Fahrstreifenwechsel situationsabhängig parametrisiert werden müssen. Dabei bleibt zunächst offen, ob das Assistenzsystem oder der Fahrer die Parameteränderungen vornimmt.

Ein weiteres Problem, dem man bei der Weiterentwicklung begegnen muss, ist die Prädizierung der Fahrtrajektorie des Assistenzsystems durch den Fahrer. Nur wenn dieser die Trajektorien in den nächsten Sekunden richtig prädiziert, ist eine sichere Interaktion zu erwarten. Um diesen Prozess zu unterstützen und die Ergebnisse hinsichtlich der Erkennung von Manöveranfängen und Manöverenden zu erleichtern, wird ein kontaktanaloges Head-Up-Display vorgeschlagen. Nach Schneid (2008) werden bei dieser Darstellung Informationen der realen Welt durch ortskorrekte Überlagerung von virtuellen Informationen markiert. Im Fall der manöverbasierten Fahrzeugführung würde man den vom Assistenzsystem in den nächsten Sekunden geplanten Weg auf die Straße projizieren. Ein ähnlicher Ansatz ist für die reine Längsführung von Bubb (1985) vorgestellt worden, der den aktuellen Bremsweg anhand einer kontaktanalogen Darstellung zeigen möchte. Neben den Längs- und Querführungsgrößen könnten vom Assistenzsystem außerdem detektierte Fahrzeuge markiert werden, um dem Fahrer zu melden, dass diese für die Regelung erkannt wurden (in einem ortsfesten Head-Up-Display werden diese beispielsweise für ACC-Systeme heute schon angezeigt, vgl. Pasenau *et al.*, 2007). Einige dieser Vorschläge sind bereits erarbeitet worden und können in Franz *et al.* (2011) eingesehen werden.

Eine weitere Verbesserung der Gesamtleistung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion könnte durch eine Situationserkennung erreicht werden, die in Abhängigkeit von einer vom System selbst ermittelten Wahrscheinlichkeit einer Erreichung einer Systemgrenze den Fahrer stärker in den Loop zurückholt.

Neben der Erkennung der Fahrsituation kann auch eine Fahrerintentionserkennung helfen. Einen Ansatz für eine solche Funktion liefern Schroven & Giebel (2008), die anhand der erkannten Intention des Fahrers eine Parametrisierung von Fahrerassistenzsystemen vornehmen möchten. In gewissen Grenzen ist dieser Ansatz bei aktuellen Fahrerassistenzsystemen schon implementiert. Um eine adäquate Beschleunigung für das Einfädeln auf den Überholfahrstreifen zu gewährleisten, wird bei ACC-Systemen die Längsbeschleunigung verändert, wenn der Fahrer dem Fahrzeug durch eine Blinkerbetätigung seinen Überholwunsch implizit mitteilt (Nessenius, 2010).

Methodische Empfehlungen für die Evaluation von zukünftigen Prototypen Eine Weiterentwicklung muss von einer Langzeituntersuchung begleitet werden. Nur wenn das in dieser Arbeit beschriebene Interaktionsverhalten über die Zeit nicht abnimmt und es somit zu keinem gänzlichen Rückzug des Fahrers aus der Fahraufgabe kommt, wird es erfolgreich sein. Daher wird eine Langzeituntersuchung vorgeschlagen, bei der Versuchspersonen in gewissen Zeitintervallen mehrmals mit dem System interagieren. Dabei muss methodisch besonders Wert auf die Evaluation der Lernkurve gelegt werden. Diese sollte sowohl mit subjektiven, aber vor allem auch mit objektiven Kenngrößen, erfasst werden. Ein Beispiel für die Ermittlung der Lernkurve kann der Fragebogen zum Systemverständnis sein, der in dieser Arbeit verwendet worden ist (vgl. Anhang C). Dieser sollte erweitert und in Vorversuchen validiert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Aufnahme von Fahrfehlern und deren Veränderung über den zeitlichen Verlauf. Außerdem sollte die im Modell der manöverbasierten Fahrzeugführung aufgeworfene Hypothese, die in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden konnte, nach einer fertigkeitsbasierten Interaktion mit der Manöverführung evaluiert werden. Lerneffekte werden oft auf motorische Fertigkeiten bezogen, die allerdings die *Stabilisierungsebene* der Fahrzeugführung betreffen und im Fall einer aktivierten Manöverführung nicht vorhanden sind. Daher müssen geeignete Kenngrößen gefunden werden, die ein fertigkeitsbasiertes Handeln auf *Bahnführungsebene* darstellen können. Ein weiterer Effekt, der in zukünftigen Untersuchungen evaluiert werden sollte, ist der Fertigkeitsverlust der manuellen Führung eines Fahrzeuges, hervorgerufen durch die Automation. Dieser Effekt konnte in dieser Pilotstudie nicht untersucht werden, da kein Proband über einen längeren Zeitraum untersucht wurde. Man kann allerdings selbst bei einer Längsschnittstudie in einem Fahrsimulator die Veränderung der Fertigkeiten der manuellen Fahrzeugführung nur schwer untersuchen, da die Probanden außerhalb der Versuche regelmäßig ein Fahrzeug führen werden.

Eine weitere methodische Empfehlung bezieht sich auf die Evaluation der *Situation Awareness*, die in dieser Arbeit nur das Level 1 umfasste. Level 2 und 3 lassen sich anhand der SAGAT-Methode (Endsley, 1988) erfassen, für deren Implementierung allerdings die Simulationssoftware gewechselt werden muss, da *STISIM Drive* keine Pausefunktion für die Simulation anbietet, wenn Fremdfahrzeuge über das Zusatzpaket *OpenModul* (Voraussetzung für ACC-Funktionen) simuliert werden.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die manöverbasierte Fahrzeugführung (aufgebaut auf dem *Conduct-by-Wire*-Konzept nach Winner & Heuss, 2005) ein möglicher Weg für eine Weiterentwicklung der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit Fahrerassistenzfunktionen ist. Da es sich hier um eine erste Konzeptüberprüfung handelt, kann noch kein abschließendes Urteil gegeben werden, es hat sich aber gezeigt, dass zumindest für die Autobahn Vorteile für den Fahrer generiert werden konnten. Derzeitige Probleme und Defizite des Ansatzes können durch weiterentwickelte Mensch-Maschine-Schnittstellen oder eine Anpassung

der Interaktionsstrategie (z. B. eine Anpassung des Automationsniveaus) erreicht werden. Letztlich muss sich zeigen, ob die Automobilhersteller von der derzeitigen Strategie der Einzelsysteme Abstand nehmen und integrierte Fahrerassistenzsysteme anbieten wollen.

Literaturverzeichnis

- Abendroth, B. 2001. *Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen*. Stuttgart: Ergonomia Verlag.
- Abendroth, B., Schreiber, M., Maul, S., Maul, D., & Bruder, R. 2011. Übertragbarkeit des Längsführungsverhaltens von Simulatorstudien auf Realfahrten - Was macht der Fahrer im Simulator anders als im Feld? In: *GfA Frühjahrskongress 2011 - Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess*. für die Veröffentlichung angenommen.
- Aschenbrenner, M., & Biehl, B. 1994. Improved Safety through Improved Technical Measures? Empirical Studies Regarding Risk Compensation Processes in Relation to Anti-Lock Braking Systems. In: Trimpop, R. M., & Wilde, G. J. (Hrsg.), *Challenges to Accident Prevention: the Issue of Risk Compensation Behavior*. Groningen: Styx Publications. 81-89.
- Bainbridge, L. 1983. Ironies of Automation. *Automatica*, **19**(6), 775–779.
- Bajcsy, R., & Nagel, H.-H. 1996. Descriptive and Prescriptive Languages for Mobility Tasks Are They Different? In: Bowyer, K., & Ahuja, N. (Hrsg.), *Advances in image understanding. A festschrift for Azriel Rosenfeld*. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society Press. 280-300.
- Bangor, A., Kortum, P. T., & Miller, J. T. 2008. An Empirical Evaluation of the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer-Interaction*, **24**(6), 574–594.
- Bartels, A., Steinmeyer, S., Brosig, S., & Spichalsky, C. 2009. Fahrstreifenwechselassistentz. In: Winner, H., Hakuli, S., & Wolf, G. (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. 562-571.
- Bayrische Motoren Werke. 2008. *Betriebsanleitung des 5er Reihe, Kapitel Geschwindigkeitsregelung*.
- Benda, H. von. 1985. *Häufigkeit von Verkehrssituationen*. Bericht zum Forschungsprojekt 7320/2. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung.
- Benda, H. von, Hoyos, C. G., & Schaible-Rapp, A. 1983. *Klassifikation und Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen*. Bericht zum Forschungsprojekt 7320. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung.
- Bender, E. 2008. *Handlungen und Subjektivurteile von Kraftfahrzeugführern bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Unterstützungssystems zur Kollisionsvermeidung*. Stuttgart: Ergonomia Verlag.
- Bender, E., Darms, M., Schorn, M., Stählin, U., Isermann, R., Winner, H., & Landau, K. 2007a. Antikollisionssystem Proreta - Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug Teil 1: Grundlagen des Systems. *ATZ*, **109**(4), 336–341.
- Bender, E., Darms, M., Schorn, M., Stählin, U., Isermann, R., Winner, H., & Landau, K. 2007b. Antikollisionssystem Proreta - Auf dem Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug Teil 2: Ergebnisse. *ATZ*, **109**(5), 456–463.

- Bernotat, R. 1970. Plenary Session: Operation Functions in Vehicle Control - Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. *Ergonomics*, **13**(3), 353–377.
- Bertone. 2001. *Bertone Filo*. http://www.bertone.it/en/filo_partners_en.htm (Abrufdatum 13.Mai 2007).
- Biester, L. 2004. Der Einsatz von Kooperation zwischen Mensch und Maschine im Kraftfahrzeug. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. VDI-Berichte 1864. 263-278.
- Biester, L. 2008. *Cooperative Automation in Automobiles*. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin.
- Biffar, F., Lassowski, R., & Sielaff, S. 2010. Der AUDI A7 - Kurs auf ein neues Marktsegment. *ATZ*, **112**(11), 820–827.
- Blaauw, G. J. 1982. Driving Experience and Task Demands in Simulator and Instrumented Car: A Validation Study. *Human Factors*, **24**(4), 473–486.
- Blana, E. 1996. *A Survey of Driving Research Simulations Around the World*. Working Paper 481. Institute of Transportation Studies, University of Leeds.
- Bleymüller, J., Gehlert, G., & Gülicher, H. 2002. *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*. 13 Aufl. WiSt Studienkurs. München: Verlag Wahlen.
- Bortz, Jürgen. 2005. *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. 6 Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bott, W. 1996. *Automatische Fahrmanöverplanung*. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Breuer, J. 2009. Bewertungsverfahren von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner, H., Hakuli, S., & Wolf, G. (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. 55-68.
- Brooke, J. 1996. SUS: A 'quick and dirty' Usability Scale. In: Jordan, P.W., Thomas, B., Weerdmeester, B.A., & McClelland, I. (Hrsg.), *Usability Evaluation in Industry*. London, UK: Taylor and Francis. 189-194.
- Brookhuis, K. A., van Driel, C.J.G., Hof, T., van Aremb, B., & Hoedemaeker, M. 2008. Driving with a Congestion Assistant; Mental Workload and Acceptance. *Applied Ergonomics*, **40**, 1019–1025.
- Bubb, Heiner. 1985. Arbeitsplatz Fahrer - Eine ergonomische Studie. *Automobil-Industrie*, **3**, 265–275.
- Buld, S., Krüger, H.-P., Hoffmann, S., Kaussner, A., Tietze, H., & Totzke, I. 2002. *Wirksamkeit von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit*. Abschlussbericht Emphasis, Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen, Förderkennzeichen 19 S 9812 7. Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaft.
- Buld, S., Tietze, H., & Krüger, H.-P. 2005. Auswirkungen von Teilautomation auf das Fahren. In: Maurer, M., & Stiller, C. (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 161-187.

- Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung. 2002. *Untersuchungsbericht zur Flugzeugkollision von Überlingen*. AX001-1-2/02.
- Carroll, J. M., & Olson, J. R. 1987. *Mental Models in Human-Computer Interaction - Research Issues About What the User of Software Knows*. Washington DC: National Academy Press.
- Chandler, R. E., Herman, R., & Montroll, E. W. 1958. Traffic Dynamics: Studies in Car Following. *Operations Research*, **6**(2), 165–184.
- Connell, J., & Viola, P. 1990. Cooperative Control of a Semi-Autonomous Mobile Robot. *In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 1990*. 1118-1121.
- Daimler Chrysler. 1996. *Faszination Forschungsfahrzeuge - Der F-200 Imagination*. <http://www.daimlerchrysler.com/dccom/0-5-7182-49-390546-1-0-0-348452-0-0-135-7165-0-0-0-0-0-0-0.html> (Abrufdatum 13.Mai 2007).
- Deuschle, S., Kessler, G. C., Lank, C., Hoffmann, G., Hakenberg, M., & Brummer, M. 2010. Einsatz elektronisch gekoppelter LKW-Konvois auf Autobahnen. *ATZ*, **112**(7-8), 570–575.
- Dickmanns, E.D. 2002. The Development of Machine Vision for Road Vehicles in the Last Decade. *In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2002*. 268–281.
- Didier, M. 2006. *Ein Verfahren zur Messung des Komforts von Abstandsregelsystemen*. Stuttgart: Ergonomia Verlag.
- Didier, M., Schreiber, M., & Bruder, R. 2008. Nutzung und Informationsstrategie für ein Abstandsregelsystem mit erweiterten Funktionen bis zum Stillstand (ACC Full Speed Range). *In: Useware 2008 - Verfahrens- und Produktionstechnik, Engineering, Informationspräsentation und Interaktionskonzepte*. VDI-Berichte 2041.
- DIN 66001. 1983. *Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung*.
- DIN EN ISO 9241 – Teil 11. 1999. *Ergonomie der Mensch-Maschine-Interaktion - Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit*.
- Donges, E. 1978. A Two-Level Model of Driver Steering Behavior. *Human Factors*, **20**(6), 691–707.
- Donges, E. 1982. Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. *Automobil-Industrie*, **2**, 183–190.
- Donges, E. 1996. Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. *Automatisierungstechnik*, **44**(5), 226–236.
- Donges, E. 2009. Fahrerhaltensmodelle. *In: Winner, H., Hakuli, S., & Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. 15-23.
- Dow, S., MacIntyre, B., Lee, J., Oezbek, C., Bolter, J. D., & Gandy, M. 2005. Wizard of Oz Support throughout an Iterative Design Process. *Pervasive Computing*, **4**(4), 18–26.

- Eckstein, L. 2000. Sidesticks im Kraftfahrzeug - ein alternatives Bedienkonzept oder Spielerei? In: Bubb, Heiner (Hrsg.), *Ergonomie und Verkehrssicherheit: Konferenzbeiträge der Herbstkonferenz 2000 TU München*. München: Herbert Uzt Verlag. 65-96.
- Eckstein, L. 2001. *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 471. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Eckstein, L. 2009. *Zukünftige Herausforderungen an die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion*. Vortrag im Fahrzeug- und Motortechnisches Seminar 2009 am 29.06.2009, ausgerichtet vom Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen (Prof. Dr.-Ing. C. Beidl) und dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik (Prof. Dr. rer. nat. H. Winner).
- Endsley, M. 1988. Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT). In: *Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference*. 789-795.
- Endsley, M. 1995. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, **37**(1), 32–64.
- Endsley, M. 1999. Situation Awareness and Human Error: Designing to Support Human Performance. In: *Proceedings of the High Consequence Systems Surety Conference*.
- Endsley, M., & Kiris, E. O. 1995. The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors*, **37**(2), 381–394.
- Fastenmeier, W. 1995. Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem. In: Fastenmeier, W. (Hrsg.), *Autofahrer und Verkehrssituation - Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Straßenverkehrssysteme*. Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Bd. 33. Köln: TÜV Rheinland. 27-77.
- Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehnig, U., & Gstalter, H. 2001. Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, **55**(1), 15–23.
- Federal Aviation Administration. 1996. *The Interfaces Between Flightcrews and Modern Flight Deck Systems*. Human Factors Team Report - Federal Aviation Administration.
- Filzek, B. 2002. *Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich*. Dissertation, TU Darmstadt.
- Fleishman, E. 1975. Toward a Taxonomy of Human Performance. *American Psychologist*, **30**(12), 1127–1149.
- Flemisch, F. O., Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T., & Schutte, P. C. 2003. *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction*. NASA/TM-2003-212672. NASA.
- Flemisch, F. O., Kelsch, J., Löper, C., Schieben, A., Schindler, J., & Heesen, M. 2008. Cooperative Control and Active Interfaces for Vehicle Assistance and Automation. In: *Proceedings of the FISITA 2008 - The Future of Automobiles and Mobility*.
- Flemisch, F. O., Kelsch, J., C.Löper, Schieben, A., Schindler, J., & Heesen, M. 2010. Wie erkunden wir die neue Lebenswelt intelligenter, haptisch kooperativer Lebensformen? Der Gestaltungsraum haptisch-multimodaler Koppelung Mensch-Automation-Regelstrecke als Teil einer kooperativen Bewegungsbeeinflussung. In: *GfA Frühjahrskongress 2010 - Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*. 165-169.

- Franz, B., Schreiber, M., Kauer, M., Geyer, S., & Bruder, R. 2011. Konzeption eines kontaktanalogen Head-up-Displays für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel von Conduct-by-Wire. In: *GfA Frühjahrskongress 2011 - Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess*. für die Veröffentlichung angenommen.
- Freyer, J., Winkler, L., Warnecke, M., & Duba, G.-P. 2010. Eine Spur Aufmerksamere - Audi Active Lane Assist. *ATZ*, **112**(12), 926–930.
- Friedrichs, F., & Yang, B. 2010. Camera-Based Drowsiness Reference for Driver State Classification under Real Driving Conditions. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2010*. 101-106.
- Fuller, R. 1984. A Conceptualization of Driver Behavior as Threat Avoidance. *Ergonomics*, **27**(11), 1139–1155.
- Gayko, J. 2005. Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das 'Honda Intelligent Driver Support System'. In: Maurer, M., & Stiller, C. (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 189-202.
- General Motors. 1959. *The Future is our Assignment - Book 4 in a Series of Visits behind the Scenes at the GM Research Laboratories: Flight the Firebird*. Detroit, USA: General Motors.
- Gordan, D. 1966. Experimental Isolation of the Driver's Visual Input. *Human Factors*, **8**(2), 129–137.
- Gray, S., Thorne, B., Susman, Z., Johnston, J., Petroff, T., Lord, D., Ele-dath, J., Bansal, M., Kreutzer, G., Das, A., & Naroditsky, O. 2007. DAR-PA Urban Challenge, Technical Paper of Team Autonomous Solutions, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.6097&rep=rep1&type=pdf>.
- Hakuli, S., Schreiber, M., & Winner, H. 2009a. Entwicklung eines Methodenkatalogs für manöverbasiertes Fahren nach dem Conduct-by-Wire-Prinzip. In: *1. Automobiltechnisches Kolloquium*.
- Hakuli, S., Bruder, R., Flemisch, F. O., Löper, C., Rausch, H., Schreiber, M., & Winner, H. 2009b. Kooperative Automation. In: Winner, H, S., Hakuli, & Wolf, G. (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg. 647-656.
- Hakuli, S., Kluin, M., Geyer, S., & Winner, H. 2010a. Development and Validation of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker. In: *Proceedings of the FISITA 2010 - Automobiles and Sustainable Mobility*.
- Hakuli, S., Winner, H., Kauer, M., & Schreiber, M. 2010b. *Systematic Development of Manoeuvre-Based Driver Assistance Functions for Conduct-by-Wire with IPG CarMaker*. Präsentation auf der apply & innovate 2010.
- Harris, T. 2003. *How GMs Hy-wire Works*. <http://www.howstuffworks.com/hy-wire.htm/printable> (Abrufdatum 1.November 2010).

- Hart, S. G., & Staveland, L. E. 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock, P. A., & Meshkati, N. (Hrsg.), *Human Mental Workload*. 239-250.
- Hassenzahl, M., Burmester, M., & K., Franz. 2003. AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität. In: *Mensch und Computer 2003: Interaktion in Bewegung*. 187-196.
- Heesen, M., Kelsch, J., Löper, C., & Flemisch, F. O. 2010. Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern. In: *11. Braunschweiger Symposium Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*.
- Heinze, N., Krüger, W., & Nagel, H.-H. 1991. Berechnung von Bewegungsverbren zur Beschreibung von aus Bildfolgen gewonnenen Fahrzeugtrajektorien in Straßenverkehrsszenen. *Informatik - Forschung und Entwicklung*, **6**, 51–61.
- Herman, R., Montroll, E.W., Potts, R. B., & Rothery, R. W. 1959. Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following. *Operations Research*, **7**(1), 86–106.
- Hohm, A. 2010. *Umfeldklassifikation und Identifikation von Überholzielen für ein Überholassistentensystem*. Dissertation, TU Darmstadt.
- Horng, W.-B., Chen, C.-Y., Chang, Y., & Fan, C.-H. 2004. Driver fatigue detection based on eye tracking and dynamk, template matching. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control 2004*. 7-12.
- Horwick, M., & Siedersberger, K.-H. 2010. Strategy and Architecture of a Safety Concept for Fully Automatic and Autonomous Driving Assistance Systems. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2010*. 955-960.
- Invent. 2001. *Stauassistent STA - Kurzdarstellung des Teilprojektes Stauassistent STA als ergänzende Information zur INVENT-Broschüre*. <http://www.invent-online.de/downloads/STA-handout-D.pdf>.
- Isermann, R., Schiele, B., Winner, H., Hohm, A., Mannale, R., Schmitt, K., Wojek, C., & Lüke, S. 2009. Elektronische Fahrerassistenz zur Vermeidung von Überholunfällen. In: *14. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug*. 525-542.
- ISO-15622. 2002. *Transport Information and Control Systems - Adaptive Cruise Control Systems - Performance Requirements and Test Procedures*.
- Johannsen, G. 1976. Preview of Man-Vehicle Control Session. In: Sheridan, T. B., & Johannsen, G. (Hrsg.), *Monitoring Behavior and Supervisory Control*. New York: Plenum Press. 3-12.
- Johannsen, G. 2006. Fahrzeugführung und Assistenzsysteme. In: Zimolong, B., & Konradt, U. (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe. 737-775.
- Johannsen, G., Boller, H. E., Donges, E., & Stein, W. 1976. *Lineare Modelle für den Menschen als Regler*. Bericht Nr. 24. Meckenheim: Forschungsinstitut für Anthropotechnik.

- Jürgensohn, T. 1997. *Hybrider Fahrermodelle*. ZMMS Spektrum Bd. 4. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- Kauer, M., Schreiber, M., Hakuli, S., Bruder, R., & Basha, A. 2009a. Nutzbarkeit taktiler Touchdisplays im Fahrzeug. In: *GfA Frühjahrskongress 2010 - Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*. 153-156.
- Kauer, M., Schreiber, M., Hakuli, S., & Bruder, R. 2009b. Taktil oder akustisch? Der Einfluss der Akustik auf die Wahrnehmung der taktilen Rückmeldung bei taktilen Touchscreens. In: *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. Tagungsband der 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*. 148-152.
- Kauer, M., Schreiber, M., Hakuli, S., & Bruder, R. 2010a. Akzeptanz manöverbasierter Fahrzeugführungskonzepte am Beispiel Conduct-by-Wire. In: *Ueware 2010 - Grundlagen, Methoden, Technologien*. 39-48.
- Kauer, M., Schreiber, M., & Bruder, R. 2010b. How to conduct a car? A design example for maneuver based driver-vehicle interaction. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2010*. 1214-1221.
- Kelley, J.F. 1984. An Iterative Design Methodology for User-Friendly Natural Language Information Applications. *ACM Transactions on Office Information Systems*, 2(1), 26-41.
- Kidd, E. A., & Laughery, K. R. 1964. *A Computer Model of Driving Behavior: The Highway Intersection Situation*. Report No VK-1938-V-1. Cornell Aeronautical Laboratory.
- Kluwe, R. H. 2006. Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung. In: Zimolong, B., & Konradt, U. (Hrsg.), *Ingenieurpsychologie*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe. 35-70.
- Käppler, W. D., & Godthelp, J. 1994. Vorhersage von Einschätzung des Fahrverhaltens mit Kraftfahrzeugen. In: Gärtner, K.-P., Stein, W., & Widdel, H. (Hrsg.), *Mensch - Maschine - Systeme und Neue Informationstechnologien*. Aachen: Augustinus Verlag. 35-70.
- Käppler, W. D., & Pitrella, F. D. 1988. Evaluation of Vehicle Handling: Design and Test of the Two-Level Sequential Judgement Rating Scale. In: *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Manual Control*. 1-28.
- Kraiss, K. F. 1994. 99% Langeweile und 1% panische Angst - über die Schwierigkeiten beim Umgang mit hochautomatisierten Systemen. In: Kerner, M. (Hrsg.), *Technik und Angst. Zur Zukunft der industriellen Zivilisation*. Aachen: THOUET Verlag. 265-280.
- Land, M. F., & Lee, D. N. 1994. Where we look when we steer. *Nature*, 369, 742-744.
- Landau, K. 2002. Usability Criteria for Intelligent Driver Assistance Systems. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3(4), 330-345.
- Laughery, K. R., Anderson, T. E., & Kidd, E. A. 1967. A Computer Simulation Model of Driver-Vehicle Performance at Intersections. In: *ACM '67: Proceedings of the 1967 22nd national conference*. New York, USA: ACM. 221-231.

- Liang, W. L., Kyte, M., Kitchener, F., & Shannon, P. 1998. Effect of Environmental Factors on Driver Speed: A Case Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1635**, 155–161.
- Lilliefors, H. W. 1967. On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, **62**(318), 399–402.
- Löper, C., & Flemisch, F. O. 2009. Ein Baustein für hochautomatisiertes Fahren: Kooperative, manöverbasierte Automation in den Projekten H-Mode und HAVEit. In: *Workshop Fahrerassistenz 2009*. 136-146.
- Luczak, H. 1975. *Untersuchung informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 10, Nr. 2. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Ma, R., & Kaber, D. B. 2005. Situation Awareness and Workload in Driving while Using Adaptive Cruise Control and a Cell Phone. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **35**, 939–953.
- Mackworth, N. H. 1961. Researches on the measurement of human performance. In: Sinaiko, H. W. (Hrsg.), *Selected Papers on Human Factors in the Design and Use of Control Systems*. Dover Publications. Wiederholungsdruck des Research Council Special Report, No. 268., 174-331.
- Matlab R2009a. 2010. *Lillietest*. Helpfiles der Statistics Toolbox von Matlab R2009a.
- Matthews, G., Sparkes, T. J., & Bygrave, H. M. 1996. Attentional Overload, Stress, and Simulated Driving Performance. *Human Performance*, **39**(1), 77–101.
- McBride, J. 2007. *DARPA Urban Challenge, Technical Paper, Ford Motor Company*. DARPA Urban Challenge, Technical Paper, Ford Motor Company, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.100.3854&rep=rep1&type=pdf>.
- McKnight, A.J., & Adams, B.B. 1970. *Driver education task analysis. Volume I: Task descriptions*. Final Report. Human Resources Research Organization.
- McRuer, D. T., Allen, R. W., & Weir, D. H. 1977. New Results in Driver Steering Control Models. *Human Factors*, **19**(4), 381–397.
- Michon, J. A. 1984. A Critical View of Driver Behaviour Models: What Do We Know, What Should We Do? In: Evans, L., & Schwing, R. C. (Hrsg.), *Human Behaviour and Traffic Safety*. Plenum Press. 485-524.
- Nagel, H.-H., & Arens, M. 2005. Innervation des Automobils und Formale Logik. In: Maurer, M., & Stiller, M. (Hrsg.), *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. 89-116.
- Nagel, H.-H., & Enkelmann, W. 1991. Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems. In: *Contribution to the 5th PROMETHEUS Workshop*. 76-85.
- Nessenius, D. 2010. Der neue VW Passat. *ATZ*, **112**(12), 916–925.
- Nilsson, L. 1995. Safety Effects of Adaptive Cruise Control in Critical Situations. In: *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems: Steps Forward Vol. 3*. 1254-1259.

- Ouiguini, R., Khiat, A., & Ouzaid, S. 2000. Local Maneuvers Planning: Application to an Autonomous Wheelchair Moving in Constrained Spaces. *Advanced Robotics*, **14**(7), 607–623.
- Parasuraman, R., Moly, R., & Singh, I.L. 1993. Performance consequences of automation-induced 'complacency'. *International Journal of Aviation Psychology*, **3**(1), 1–23.
- Pasenau, T., Sauer, T., & Ebeling, J. 2007. Aktive Geschwindigkeitsregelung mit Stop&Go-Funktionen. *ATZ*, **109**(10), 900–908.
- Rasmussen, J. 1983. Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **13**(3), 257–266.
- Rauch, N. 2008. *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*. Dissertation, Universität Würzburg.
- Rühmann, H., & Bubb, H. 2006. Fahrerassistenzsysteme - Ein Gewinn an Sicherheit und Komfort oder elektronischer Schnickschnack. In: Bubb, H. (Hrsg.), *Ergonomie aktuell, Sommer 2006 Ausgabe 007*. Lehrstuhl für Ergonomie. 2-13.
- Rockwell, T. H. 1972. Eye Movement Analysis of Visual Information Acquisition in Driving: An Overview. In: *Proceedings of the Sixth Conference of the Australian Road Research Board*, vol. 6. 316-331.
- Rohmert, W. 1994. *Arbeitswissenschaftliche Methodensammlung*. Darmstadt: Institut für Arbeitswissenschaft.
- Rowsome, F. 1958. What it's Like to Drive an Auto-Pilot Car. *Popular Science*, **4**, 105–107 u. 248–250.
- Rötting, M. 2001. *Parametersystematik der Augen- und Blickbewegungen für arbeitswissenschaftliche Untersuchungen*. Schriftreihe Rationalisierung und Humanisierung Band 34. Aachen: Shaker Verlag.
- Sacher, H. 2008. *Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung*. Dissertation, TU München.
- Sagberg, F., Fosser, S., & Saetermo, I.-A. 1997. An Investigation of Behavioural Adaption to Airbags and Antilock Brakes Among Taxi Drivers. *Accident Analysis and Prevention*, **29**(3), 293–302.
- Sarter, N., & Woods, D. 1995. How in the World Did We Ever Get into That Mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control. *Human Factors*, **37**(1), 5–19.
- Schaller, T., J.Schiehlen, & Gradenegger, B. 2008. Stauassistentz - Unterstützung des Fahrers in der Quer- und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz. In: *Tagung aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz 2008*.
- Schieben, A., & Flemisch, F. O. 2008. Who is in Control? Exploration of Transitions of Control between Driver and an eLane Vehicle Automation. In: *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme 2008*. VDI-Berichte 2048. 455-469.

- Schieben, A., Heesen, M., Schindler, J., Kelsch, J., & Flemisch, F. O. 2009. The Theater-System Technique: Agile Designing and Testing of System Behavior and Interaction, Applied to Highly Automated Vehicles. *In: AutomotiveUI 2009 - First International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*. 43-46.
- Schlick, C. M., Bruder, R., & Luczak, H. 2010. *Arbeitswissenschaft*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.
- Schmidt, G., Kiss, M., Babbel, E., & Galla, A. 2008. The Wizard on Wheels: Rapid Prototyping and User Testing of Future Driver Assistance Using Wizard of Oz Technique in a Vehicle. *In: Proceedings of the FISITA 2008 - The Future of Automobiles and Mobility*.
- Schmidt, L., & Luczak, H. 2006. Prozessführung in komplexen Mensch-Maschine-Systemen. *In: Zimolong, B., & Konradt, U. (Hrsg.), Ingenieurpsychologie*. Göttingen, Bern, Toronto, Seattle: Hogrefe. 807-838.
- Schmidtke, H. 1966. *Leistungsbeeinflussende Faktoren im Radar-Beobachtungsdienst*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1736. Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Schneid, M. 2008. *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug*. Dissertation, TU München.
- Schomerus, J., Flemisch, F.O., Kelsch, J., Schieben, A., & Schmunzsch, U. 2006. Erwartungsbasierte Gestaltung mit der Theatersystem-/ Wizard-Of-Oz-Technik am Beispiel eines haptischen Assistenzsystems. *In: AAET 2006 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. 209-225.
- Schreiber, M., Kauer, M., & Bruder, R. 2009. Conduct by Wire - Maneuver Catalog for Semi-Autonomous Vehicle Guidance. *In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2009*. 1279-1285.
- Schreiber, M., Kauer, M., Hakuli, S., & Bruder, R. 2010a. Evaluation von teilautonomer Fahrzeugführung mit Hilfe der Wizard of Oz-Technik. *In: GfA Frühjahrskongress 2010 - Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*. 161-164.
- Schreiber, M., Kauer, M., Schlesinger, D., Hakuli, S., & Bruder, R. 2010b. Verification of a Maneuver Catalog for a Maneuver-Based Vehicle Guidance System. *In: Proceedings of the IEEE Systems, Men, and Cybernetics 2010*. 3683 - 3689.
- Schroven, F., & Giebel, T. 2008. Fahrerintentionserkennung für Fahrerassistenzsysteme Driver Intent. *In: Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme*. VDI-Berichte 2048. 153-162.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. 1965. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, **52**(3), 591–611.
- Shinar, D. 2007. *Traffic Safety and Human Behavior*. Bingley, UK: Emerald.
- Sivak, M. 1996. The Information that Drivers Use: Is it Indeed 90% Visual? *Perception*, **25**(9), 1081–1089.

- Smolensky, M. W. 1993. Toward the physiological measurement of situation awareness: The case for eye movement measurements. *In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting*. 41.
- Spies, R., Peters, A., Toussaint, C., & Bubb, H. 2009. Entwicklung eines Touchpads mit adaptiv - haptisch veränderlicher Oberfläche zur Fahrzeuginfotainmentbedienung. *In: Usability Professional 2009*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Stanton, N. A., & Marsden, P. 1996. From Fly-by-Wire to Drive-by-Wire: Safety Implications of vehicle automation. *Safety Science*, **24**(1), 35–49.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. 1998. Vehicle automation and Driving Performance. *Ergonomics*, **41**(7), 1014–1028.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. 2000. The Role of Mental Models in Using Adaptive Cruise Control. *In: Proceedings of the IEA 2000/ HFES 2000 Congress Vol. 3*. 298–301.
- Stanton, N. A., & Young, M. S. 2005. Driver Behaviour with Adaptive Cruise Control. *Ergonomics*, **48**(10), 1294–1212.
- Stanton, N. A., Young, M., & McCaulder, B. 1997. Drive-by-Wire: The Case of Driver Workload and Reclaiming Control with Adaptive Cruise Control. *Safety Science*, **27**(2), 149–159.
- Systems Technology, Incorporat. 2008. *Open Module Programming Guide - Version 2.08.04*.
- Takae, Y., Iwai, M., Kubota, M., & Watanabe, T. 2006. A Study of Drivers' Trust in a Low-Speed Following System. *In: Jurgen, R.K. (Hrsg.), Adaptive Cruise Control*. Warrendale, USA: SAE -Progress in Technology Automotive Electronics Series. 41–45.
- Tölle, W. 1996. *Ein Fahrmaöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 299. VDI.
- Volpe, R., Balaram, J., Ohm, T., & Ivlev, R. 1996. The Rocky 7 Mars Rover Prototype. *In: International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3*. 1558–1564.
- Ward, N. 2000. Automation of Task Processes: An Example of Intelligent Transportation Systems. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, **10**(4), 395–408.
- Wegscheider, M., & Prokop, G. 2005. Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen. *In: Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung - Mess- und Versuchstechnik*. VDI-Berichte 1900. 17–36.
- Weinberger, M., Winner, H., & Bubb, H. 2001. Adaptive cruise control field operational test - the learning phase. *JSAE Review*, **22**(4), 487–494.
- Welch, B. L. 1947. The Generalization of Student's Problem when Several Different Population Variances are Involved. *Biometrika*, **34**(1), 28–35.
- Welford, A. T. 1960. The Measurement of Sensory-Motor Performance: Survey and Reappraisal of Twelve Years' Progress. *Ergonomics*, **3**(3), 189–230.

- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. 2000. *Engineering Psychology and Human Performance*. 3. Aufl. New Jersey: Prentice-Hall.
- Wickens, C.D., Lee, J. D., Liu, Y., & Becker, S. E. G. 2004. *An Introduction to Human Factors Engineering*. 2. Aufl. New Jersey: Pearson.
- Wilde, G. J. S. 1982. The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. *Risk Analysis*, **2**(4), 209–225.
- Winner, H. 2009. Sind Assistenzsysteme noch aktuell? *ATZ*, **7**(111), 487.
- Winner, H., & Heuss, O. 2005. X-By-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick. In: *Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug - Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft*. Ergonomia Verlag. 79-115.
- Winner, H., Hakuli, S., Bruder, R., Konigorski, U., & Schiele, B. 2006. Conduct-by-Wire - ein neues Paradigma für die Entwicklung der Fahrerassistenz. In: *4. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. 112-124.
- Winner, H., Danner, B., & Steinle, J. 2009a. Adaptive Cruise Control. In: Winner, H., Hakuli, S., & Wolf, G. (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. 478-521.
- Winner, H., Hakuli, S., & G.Wolf. 2009b. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg Teubner.
- Wolf, H., Zöllner, R., & Bubb, H. 2005a. Ergonomische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion bei gleichzeitig agierenden Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, **2005**(3), 119–124.
- Wolf, H., Zöllner, R., & Bubb, H. 2005b. Ergonomischer Lösungsansatz für die gleichzeitige Rückmeldung von Fahrerassistenzsystemen. In: *Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz 2005*.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. 1997. Automotive automation: Investigating the impact on drivers' mental workload. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, **1**(4), 325–336.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. 2007. What's Skill got to do with it? Vehicle Automation and Driver Mental Workload. *Ergonomics*, **50**(8), 1324–1339.

A Zuordnung der Benennung der Entscheidungspunkte aus der retrospektiven Analyse zu den Manövern nach Nagel & Enkelmann (1991) bei der Entscheidungspunktanalyse aus Kapitel 3.2.2

Manöver nach Nagel & Enkelmann (1991)	Zugeordnete Benennung der Probanden in der Entscheidungspunktanalyse
Fahrstreifenwechsel FSW	Auf rechte Spur einordnen, Auf rechte Spur wechseln, Auf Überholspur wechseln, Ausscheren, Einfädeln, Einscheren, Fahrbahnwechsel, Fahrbahnwechsel links, Fahrbahnwechsel rechts, Fahrspurwechsel links, Fahrspurwechsel rechts, Fahrstreifenwechsel links, Fahrstreifenwechsel rechts, Linke Spur, Links ausscheren, Links einfädeln, Links einordnen, Links rausfahren, Nach links einordnen, Nach rechts wechseln, Rechte Spur wählen, Rechts einordnen, Rechts einscheren, Rechts rüberfahren, Rechts zurückfahren, Spurwechsel, Spurwechsel einfädeln, Spurwechsel ausscheren, Spurwechsel einscheren, Spurwechsel links, Spurwechsel rechts, Streifenwechsel links, Streifenwechsel rechts, Wechseln links, Wechseln rechts
Überholen	LKW Überholvorgang, Überholen, Überholen einleiten, Überholmanöver, Überholvorgang, Überholvorgang einleiten,
Sonstige	Auf Autobahn auffahren, Auffahrt, Beschleunigen, einordnen, Platz machen für Einfädelspur, Rechts abfahren, Vordermann überwachen

B Antworten der Versuchspersonen ($N = 31$) der *Wizard of Oz*-Studie aus Kapitel 3.3 auf die offene Frage „Hat Ihnen bei der Absolvierung der Fahrszenarios ein Manöver gefehlt?“

Aussagen der Versuchspersonen:

- Innerhalb einer Fahrspur in eine Hälfte wechseln
- Stop
- mehr Verkehr
- bremsen, so dass man nicht ganz zum stehen kommt
- Anhalten
- Ausweichen
- Gas geben
- schneller/langsamer
- Geschwindigkeitsreduzierung
- mehrere Autos überholen
- überholen mehrerer Fahrzeuge
- überholen dann beim Überholen bleiben

C Fragebogen zum Systemverständnis



Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft
Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder



Fragen zur Systembedienung

Bitte beantworten Sie in diesem Fragebogen. Kreuzen Sie die richtigen Antworten an. Es können auch mehrere Antworten richtig sein.

A.1 Was passiert wenn Sie auf die Bremse treten?

A.1.I	Das System wird ausgeschaltet und das Fahrzeug reduziert seine Geschwindigkeit.	<input type="checkbox"/>
A.1.II	Es passiert nichts.	<input type="checkbox"/>
A.1.III	Sie bekommen eine Aufforderung zur Übernahme der manuellen Kontrolle.	<input type="checkbox"/>

A.2 Was passiert, wenn Sie auf das Gaspedal drücken?

A.2.I	Das System wird ausgeschaltet und das Fahrzeug erhöht seine Geschwindigkeit.	<input type="checkbox"/>
A.2.II	Es passiert nichts.	<input type="checkbox"/>
A.2.III	Das Fahrzeug erhöht seine Geschwindigkeit, wobei das System angeschaltet bleibt.	<input type="checkbox"/>

A.3 Was passiert, wenn Sie einen Fahrstreifenwechsel beauftragen und der Fahrstreifen neben Ihnen nicht frei ist?

A.3.I	Das System nimmt Ihren Befehl nicht an.	<input type="checkbox"/>
A.3.II	Das System merkt sich Ihren Befehl und führt den Wechsel innerhalb der nächsten 10 Sekunden aus, sollte er möglich werden. Danach verfällt der Befehl.	<input type="checkbox"/>
A.3.III	Das System behält den Befehl bei, bis dessen Ausführung möglich wird.	<input type="checkbox"/>



A.4 Wie können Sie ein beauftragtes Manöver abbrechen?

A.4.I	Mit Hilfe der Taste zum Abbruch eines Manövers.	<input type="checkbox"/>
A.4.II	Durch drücken der Taste „Straßenverlauf folgen“	<input type="checkbox"/>
A.4.III	Durch Übernahme der manuellen Kontrolle.	<input type="checkbox"/>
A.4.IV	Durch Betätigung des Gaspedals.	<input type="checkbox"/>

A.5 Was passiert nach Beendigung eines beauftragten Manövers?

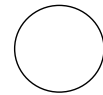
A.5.I	Das System fällt in den Modus „Straßenverlauf folgen“ zurück.	<input type="checkbox"/>
A.5.II	Das Fahrzeug bleibt stehen und wartet auf Ihre nächste Eingabe.	<input type="checkbox"/>
A.5.III	Das System fordert Sie während der Manöverausführung auf „Straßenverlauf folgen“ zu beauftragen.	<input type="checkbox"/>

A.6 Was passiert, wenn Sie Ihre Wunschgeschwindigkeit auf 120km/h gesetzt haben, die maximal erlaubte Geschwindigkeit jedoch 100km/h vorsieht?

A.6.I	Das Fahrzeug behält die Wunschgeschwindigkeit bei.	<input type="checkbox"/>
A.6.II	Das System behält die Wunschgeschwindigkeit bei und macht Sie auf die Geschwindigkeitsbeschränkung aufmerksam.	<input type="checkbox"/>
A.6.III	Das System bremst Ihr Fahrzeug automatisch auf 100km/h ab.	<input type="checkbox"/>

A.7 Wie können Sie während der Fahrt aus dem manuellen Modus in den Manövermodus wechseln?

A.7.I	Durch Wegnahme der Hände vom Lenkrad.	<input type="checkbox"/>
A.7.II	Durch drücken eines beliebigen Manövers.	<input type="checkbox"/>
A.7.III	Durch betätigen des Manövers „Straßenverlauf folgen“.	<input type="checkbox"/>



A.8 Wie können Sie nicht aus dem Manövermodus in den manuellen Modus wechseln?

A.8.I	Durch einen Lenkeingriff.	<input type="checkbox"/>
A.8.II	Durch betätigen des Buttons „Übernahme der manuellen Steuerung“.	<input type="checkbox"/>
A.8.III	Durch betätigen des Gaspedals.	<input type="checkbox"/>
A.8.IV	Durch betätigen der Bremse.	<input type="checkbox"/>

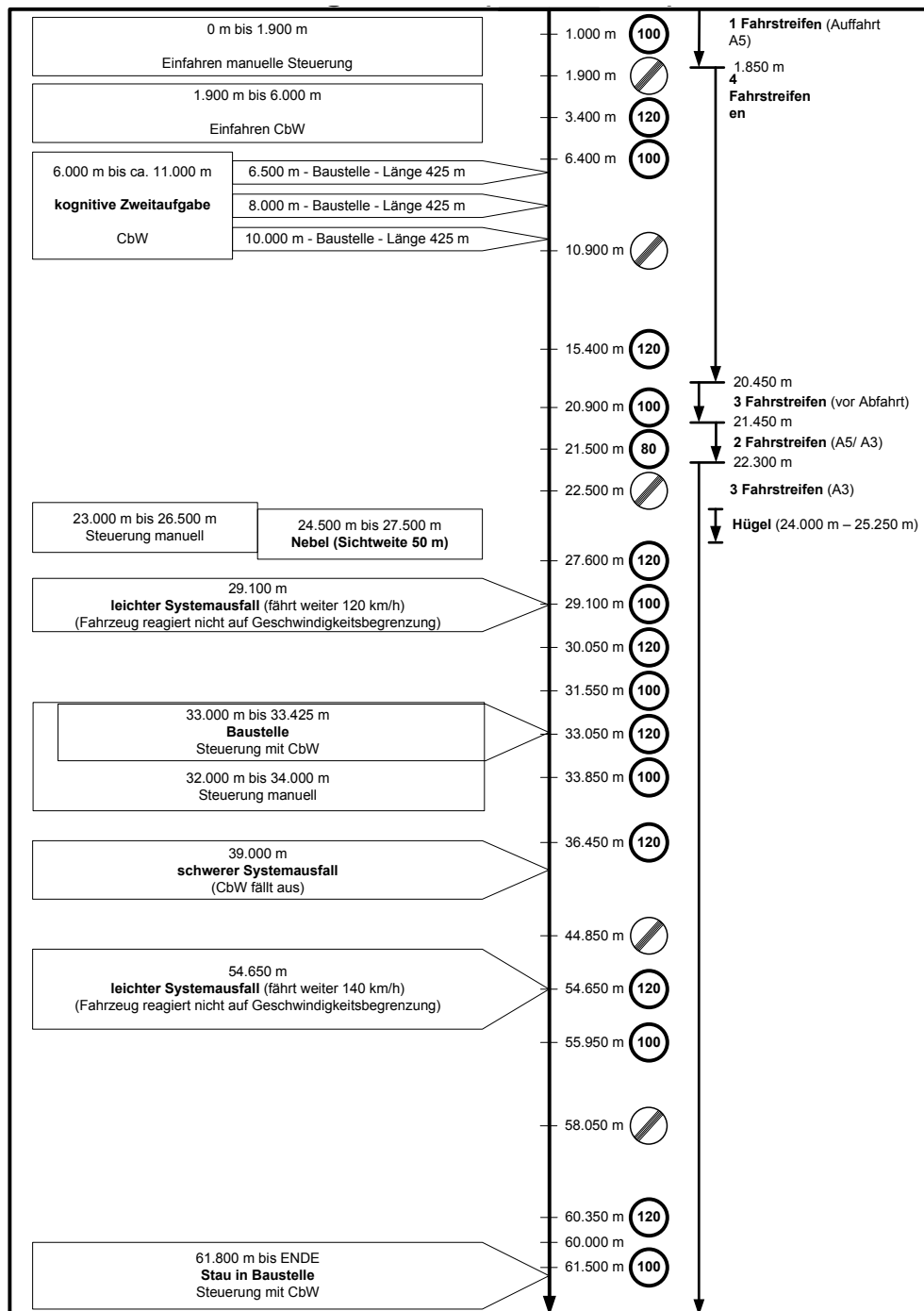
A.9 Was passiert, wenn vor Ihnen ein LKW fährt, wobei die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs ist höher als die des LKW? Sie nähern sich dem LKW.

A.9.I	Das eigene Fahrzeug bremst auf die Geschwindigkeit des LKWs ab und hält den eingestellten Sicherheitsabstand ein.	<input type="checkbox"/>
A.9.II	Sie werden gewarnt und müssen sofort eingreifen.	<input type="checkbox"/>
A.9.III	Sie müssen eingreifen, da es sonst zu einer Kollision kommen würde.	<input type="checkbox"/>

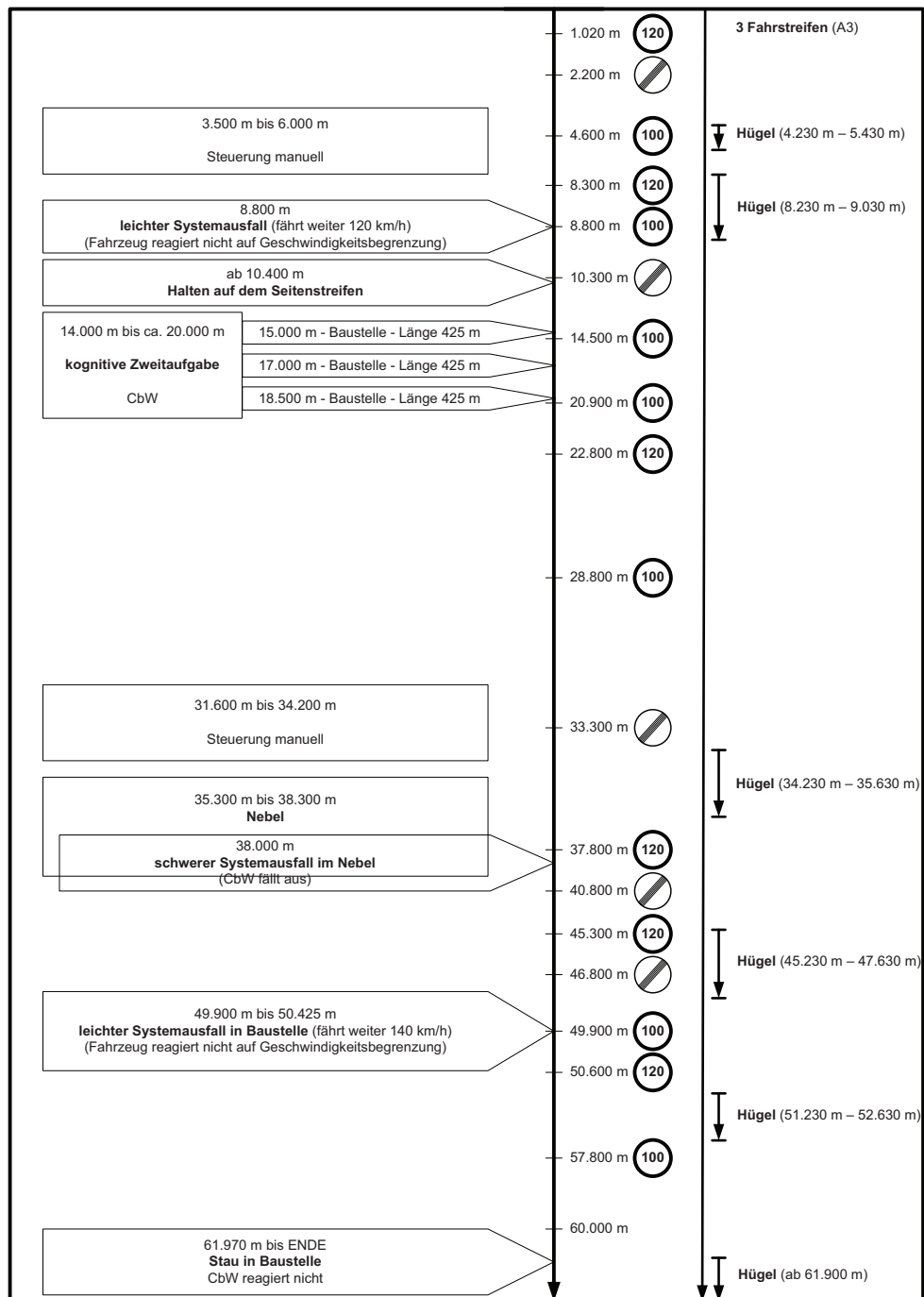
A.10 Was passiert, wenn Sie während einer maximal erlaubten Geschwindigkeit von 100 km/h eine Wunschgeschwindigkeit von 140 km/h beauftragen?

A.10.I	Das Fahrzeug beschleunigt auf 140 km/h.	<input type="checkbox"/>
A.10.II	Die Wunschgeschwindigkeit wird registriert, das Fahrzeug fährt aber weiter 100 km/h bis die Geschwindigkeitsbegrenzung aufgehoben wird.	<input type="checkbox"/>
A.10.III	Die Wunschgeschwindigkeit lässt sich in dieser Zeit nicht höher als 100 km/h einstellen.	<input type="checkbox"/>

D Versuchsstrecke 1



E Versuchsstrecke 2



Lebenslauf

Name Dipl.-Wirtsch.-Ing. Michael Schreiber

Schulbildung

09/85–06/89 Grunelius Grundschule, Frankfurt am Main
07/89–06/99 Freiherr vom Stein Gymnasium, Frankfurt am Main
06/99 Abschluss Abitur

Studium

10/99–07/07 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit Fachrichtung Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt
Diplomarbeit: Konzepte für zukünftige Bedienelemente der Fahrzeugführung

Beruf

09/07-01/11 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft des Fachbereichs Maschinenbau der TU Darmstadt
02/11-heute Compartment Integration Design Engineer (Cockpit) bei der Adam Opel AG

Veröffentlichungen

Abendroth, B., Schreiber, M., Maul, S., Maul, D., & Bruder, R. 2011. Übertragbarkeit des Längsverhaltens von Simulatorstudien auf Realfahrten - Was macht der Fahrer im Simulator anders als im Feld? In: GfA Frühjahrskongress 2011 - Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess.

Bruder, R., Abendroth, B., Didier, M., Schreiber, M., & von Wilamowitz-Moellendorf, M. 2008. Safe and Pleasurable Human Machine Interfaces for Automobile. In: Convergence 2008. Society of Automotive Engineers (SAE).

Bruder, R., Franz, B., Kauer, M., & Schreiber, M. 2011. Fahrerverhalten einer kooperativen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. S. 1-11 aus: Bruder, Ralph, & Winner, Hermann (Hrsg.), Zukunft der Fahrzeugführung - kooperativ oder autonom?, 5. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug.

Didier, M., Schreiber, M., & Bruder, R. 2008. Nutzung und Informationsstrategie für ein Abstandsregelsystem mit erweiterten Funktionen bis zum Stillstand (ACC Full Speed Range). In: Useware 2008 - Verfahrens- und Produktionstechnik, Engineering, Informationspräsentation und Interaktionskonzepte. VDI-Berichte 2041.

Franz, B., Schreiber, M., Kauer, M., Geyer, S., & Bruder, R. 2011. Konzeption eines kontaktanalogen Head-up-Displays für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel von Conductby-Wire. In: GfA Frühjahrskongress 2011 - Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess.

- Franz, B., Kauer, M., Schreiber, M., Blanke, A., Distler, S., Bruder, R., & Geyer, S. 2011 (November). Maneuver-Based Driving Today and in the Future - Development of a New Human-Machine Interface for Conduct-by-Wire. S. 295-306 aus: Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit. VDI-Berichte, vol. 2134.
- Hakuli, S., Schreiber, M., & Winner, H. 2009. Entwicklung eines Methodenkatalogs für manöverbasiertes Fahren nach dem Conduct-by-Wire-Prinzip. In: 1. Automobiltechnisches Kolloquium.
- Hakuli, S., Bruder, R., Flemisch, F. O., Löper, C., Rausch, H., Schreiber, M., & Winner, H. 2009. Kooperative Automation. In: Winner, H, S., Hakuli, & Wolf, G. (Hrsg.), Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Wiesbaden: Vieweg. 647-656.
- Kauer, M., Schreiber, M., Hakuli, S., Bruder, R., & Basha, A. 2009. Nutzbarkeit taktiler Touchdisplays im Fahrzeug. In: GfA Frühjahrskongress 2010 - Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. 153-156.
- Kauer, M., Schreiber, M., Hakuli, S., & Bruder, R. 2009. Taktile oder akustisch? Der Einfluss der Akustik auf die Wahrnehmung der taktilen Rückmeldung bei taktilen Touchscreens. In: Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. Tagungsband der 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. 148-152.
- Kauer, M., Schreiber, M., Hakuli, S., & Bruder, R. 2010. Akzeptanz manöverbasierter Fahrzeugführungskonzepte am Beispiel Conduct-by-Wire. In: Useware 2010 - Grundlagen, Methoden, Technologien. 39-48.
- Kauer, M., Schreiber, M., & Bruder, R. 2010. How to conduct a car? A design example for maneuver based driver-vehicle interaction. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2010. 1214-1221.
- Kauer, M., Schreiber, M., Franz, B., Hakuli, S., Geyer, S., Eggers, D., & Bruder, R. 2011. Nutzungsszenarien der manöverbasierten Fahrzeugführung. S. 809-812 aus: Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und herstellungsprozess, 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft.
- Schreiber, M., Kauer, M., & Bruder, R. 2009. Conduct by Wire - Maneuver Catalog for Semi-Autonomous Vehicle Guidance. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2009. 1279-1285.
- Schreiber, M., Kauer, M., Bruder, R., Schmitt, F., & Marx, B. 2009. Konzipierung eines interaktiven Informationsdisplays - Aber Wii?! In: Brau, H., Diefenbach, S., Hassenzahl, M., Kohler, K., Peissner, M., Petrovic, K., Thielsch, M., Ullrich, D., & Zimmermann, D. (Hrsg.), Usability Professional 2009. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. 189-193.
- Schreiber, M., von Wilamowitz-Moellendorff, M., & Bruder, R. 2009. New Interaction Concepts by Using the Wii Remote. In: Jacko, J.A. (Hrsg.), Human-Computer Interaction, Part II, HCII 2009, LNCS 5611. Berlin: Springer. 261-270.
- Schreiber, M., Kauer, M., Hakuli, S., & Bruder, R. 2010. Evaluation von teilautonomer Fahrzeugführung mit Hilfe der Wizard of Oz-Technik. In: GfA Frühjahrskongress 2010 - Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. 161-164.

Schreiber, M., Kauer, M., Schlesinger, D., Hakuli, S., & Bruder, R. 2010. Verification of a Maneuver Catalog for a Maneuver-Based Vehicle Guidance System. In: Proceedings of the IEEE Systems, Men, and Cybernetics 2010. 3683 - 3689.

von Wilamowitz-Moellendorff, M., Schreiber, M., & Bruder, R.. 2008. Umsetzung von neuen Interaktionskonzepten mit Hilfe der Wii-Remote - Wii interagiere ich? S. 259 - 263 aus: Brau, Hennig, Diefenbach, Sarah, Hassenzahl, Marc, Koller, Franz, Peissner, Matthias, & Röse, Kerstin (Hrsg.), Usability Professional 2008.

Frankfurt am Main, 1. Januar 2012